

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**  
**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису»  
УДК 621.382

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**зі спеціальності 171 –Електроніка**  
**Спеціалізація «Електронні прилади та пристрої»**

на тему: **Лінія затримки високочастотних сигналів**

**Виконав:**

Студент 2 курсу, групи ДЕ-71МП **Решетник Анна Олександрівна** \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

Старший викладач, канд. техн. наук **Семікіна Т.В.** \_\_\_\_\_

**Нормоконтроль:**

Професор, д.т.н., с.н.с.

**Жовнір М.Ф.** \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

Доцент кафедри мікроелектроніки,  
канд.техн. наук , доцент

**Івашук А.В.** \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Київ – 2018**

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) \_\_\_\_\_ Е л е к т р о н і к и

Кафедра \_\_\_\_\_ Електронні прилади та пристрої

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – **171– Електроніка (Електронні прилади та пристрої)**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Решетник Анна Олександрівна**

**1. Тема дисертації** **Лінія затримки високочастотних сигналів**

і науковий керівник **Семікіна Тетяна Вікторівна**, старший викладач, к.т.н.

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р. № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студенткою дисертації:** « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**3. Об'єкт дослідження:** Лінія затримки на поверхневих акустичних хвилях

**4. Предмет дослідження:** фізико-технічна модель лінії затримки поверхневих акустичних хвилях (ЛЗ ПАХ); час затримки 1,8 мкс; центральна частота – 50 МГц; смуга пропускання 4,0 МГц на рівні – 3,0 дБ; привнесені втрати на основній частоті не більше 15 дБ.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** Анотація; вступ; аналіз науково-технічної літератури по функціональним пристроям на ПАХ; функціональна схема та математична модель лінії затримки на ПАХ; методика та результати розрахунку амплітудно-частотної характеристики, конструктивних та акустоелектричних параметрів ЛЗ на ПАХ; результати експериментальних досліджень; список використаної науково-технічної літератури.

**6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:** Складальне креслення експериментального зразка ЛЗ ПАХ; структурна схема установки для дослідження характеристик ЛЗ ПАХ; плакати з формулами та результатами розрахунків.

## 7. Перелік публікацій:

7.1. Решетник А.О., Жовнір М.Ф. Датчик мікропереміщень на ПАХ-хвилеводі / Матеріали XIV Всеукраїнської наук. конф. студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука, духовність». – Київ, ун-тет «Україна», 04-06.04.2017. – С. 466-467.

7.2. Решетник А.О., Жовнір М.Ф. Радіочастотна мітка на поверхневих акустичних хвилях / Матеріали XI наук.-практ.конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки». – Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», ФЕЛ, 06-07.04. 2017. – С.114-118.

**8. Дата видачі завдання:** 10.09.2018 р.

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по функціональним пристроям на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ).	15.09.2018	
2.	Дослідження фізико-математичної моделі високочастотної ЛЗ на ПАХ	30.09.2018	
3.	Розрахунок конструктивних та акустоелектричних параметрів ЛЗ на ПАХ	15.10.2018	
4.	Розробка складального креслення ЛЗ на ПАХ	30.10.2018	
5.	Експериментальні дослідження високочастотної ЛЗ на ПАХ	10.11.2018	
6.	Технологічний процес виготовлення високочастотних ЛЗ на ПАХ	15.11.2018	
7.	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та результатами розрахунків, підготовка доповіді	30.11.2018	

Студентка гр. ДЕ-71МП

Решетник А.О.

Науковий керівник

Семікіна Т.В.

## **РЕФЕРАТ**

**Лінія затримки високочастотних сигналів** / Магістерська дисертація зі спеціальності **171– Електроніка** спеціалізації «**Електронні прилади та пристрої**». Решетник **А.О.** НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-71МП. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. – 79 с. іл. 15, табл.8.

**Ключові слова:** ПАХ – поверхневі акустичні хвилі; ОАХ – об’ємні акустичні хвилі; АЧХ – амплітудно-частотна характеристика; ФЧХ – фазочастотна характеристика; ЛЧМ – лінійно-частотна модуляція; РЛС – радіолокаційна станція; НВЧ – надвисокі частоти.

**Короткий зміст роботи:** Представлено результати розробки лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) з затримкою 1,8 мкс на центральній частоті 50 МГц, з шириною смуги пропускання 4,0 МГц на рівні – 3 дБ та привнесеними втратами на основній частоті 13 дБ.

Приведено результати розробки та дослідження математичної моделі ЛЗ на ПАХ на основі дискретних джерел та методику інженерного розрахунку лінії затримки, яка дозволяє визначати конструктивні та акустоелектричні параметри.

Експериментальні дослідження 4-х зразків ЛЗ на ПАХ проведено за допомогою стандартної вимірювальної апаратури. Значення експериментально отриманих параметрів від розрахункових відрізняються не більше  $\pm 10,0$  %, що підтверджує придатність розробленої методики для розрахунку ЛЗ на ПАХ, які використовуються в радіоелектронних системах.

## **А Н О Т А Ц І Я**

В магістерській роботі представлено результати розробки лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) з затримкою 1,8 мкс на центральній частоті 50 МГц, з шириною смуги пропускання 4,0 МГц на рівні – 3 дБ та привнесеними втратами на основній частоті 13 дБ.

Приведено результати розробки та дослідження математичної моделі ЛЗ на ПАХ на основі дискретних джерел та методика інженерного розрахунку лінії затримки, яка дозволяє визначати конструктивні та акустoeлектричні параметри.

Експериментальні дослідження 4-х зразків ЛЗ на ПАХ проведено за допомогою стандартної вимірювальної апаратури. Значення експериментально отриманих параметрів від розрахункових відрізняються не більше  $\pm 10,0$  %, що підтверджує придатність розробленої методики для розрахунку ЛЗ на ПАХ, які використовуються в радіoeлектронних системах.

## **S U M M A R Y**

In the master's project the results of the development of delay line based on surface - acoustics waves (SAW) with the delay 1,8mcs on the central frequency 50 MHz, with the bandwidth 4,0 MHz on the level – 3 dB and the insertion losses on the fundamental frequency 13 dB are presented.

The results of development and research of mathematical model of delay line on SAW on the base of discrete sources and methodic of engineering calculation of delay line which makes it possible to evaluate the constructional and acoustic-electronical parameters are submitted.

The experimental researchs of 4 samples of delay line on SAW were obtained with helping of standard measuring equipments . The experimentally determined and calculated parameters differ from each other on not more than  $\pm 10\%$ , which confirms the applicability of the developed methodic for calculation of delay lines on SAW, which are used in the radio-electronical systems.



## З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	7
В С Т У П .....	8
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	10
2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....	36
2.1. Математична модель лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях .....	36
2.2. Методика розрахунку конструктивних параметрів лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях .....	41
2.3. Методика розрахунку акустоелектричних параметрів зустрічно- штирових перетворювачів.....	47
3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ .....	53
3.1. Виготовлення звукопроводу.....	54
3.2. Формування електродних структур .....	57
3.3. Конструктивні особливості пристроїв на поверхневих акустичних хвилях .....	69
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	72
4.1. Методика експериментальних досліджень ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях .....	72
4.2. Результати експериментальних досліджень ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях .....	74
В И С Н О В К И .....	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ...	78

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ПАХ – поверхневі акустичні хвилі

ОАХ – об’ємні акустичні хвилі

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ФЧХ – фазочастотна характеристика

ЛЧМ – лінійно-частотна модуляція

РЛС – радіолокаційна станція

НВЧ – надвисокі частоти



## ВСТУП

Функціональні пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), набувають все більшої актуальності. Найперспективнішою галуззю застосування цих пристроїв є системи обробки інформації в різноманітних галузях сучасної техніки- радіотехніці, телебаченні, зв'язку, інформатиці, сейсмології тощо.

Поверхневі акустичні хвилі являють інтерес для застосування їх у системах обробки інформації завдяки їхнім унікальним властивостям, що забезпечують створення функціональних пристроїв малих розмірів, високих електричних параметрів і надійності з використанням традиційної технології мікроелектроніки.

Насамперед ПАХ мають низьку швидкість поширення порівняно з електромагнітними хвилями. Завдяки цьому довжина ПАХ приблизно в  $10^5$  менша від електромагнітних хвиль тієї самої частоти, тому функціональні пристрої на ПАХ мають значно менші розміри й масу, ніж електромагнітні пристрої.

Оскільки поверхнева хвиля поширюється вздовж поверхні твердого тіла і локалізована поблизу її поверхні, то нею можна керувати в будь-якій точці шляху. Це дає широкі можливості для створення різноманітних функціональних пристроїв.

Перспективність пристроїв на ПАХ визначається також високою добротністю і стабільністю п'єзокристалів, технологічністю виготовлення, наявністю ефективних методів збудження та приймання ПАХ, простотою узгодження елементів на ПАХ із електронними пристроями. При їх виготовленні використовуються сучасні технологічні методи, що і при виробництві планарних інтегральних мікросхем: термовакuumне напилення тонких металевих, діелектричних та напівпровідникових плівок, методи прецизійної фотолітографії. Схемна, конструктивна і технологічна

сумісність пристроїв на ПАХ з планарними мікросхемами визначають перспективи їх впровадження в мікроелектронну апаратуру.

Елементи та пристрої на ПАХ, які реалізують різноманітні операції обробки радіосигналів, знаходять широке використання в різноманітних областях сучасної техніки: радіоелектроніці, автоматичній, телебаченні, радіолокації, вимірювальній техніці тощо. Лінії затримки на ПАХ більш технологічні у порівнянні з об'ємно-хвильовими лініями затримки. Генератори на ПАХ працюють від одиниць до тисяч мегагерц без помноження частоти. Фільтри на ПАХ мають високу стабільність параметрів і малі розміри. На основі ліній затримки з багатьма відводами виготовляють фільтри стиснення фазомодульованих сигналів.

Звичайно довжина кристалічної підкладки не перевищує 10 см. Оскільки виникають труднощі і в одержанні, і в обробці зразків великої довжини, тому максимальна затримка при одному звукопроводі становить приблизно 25 мкс для  $\text{LiNbO}_3$  та  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ . Для створення ліній тривалої затримки можна послідовно об'єднати декілька відносно коротких ліній затримки з розподільчими підсилювачами для підвищення рівня сигналу.

Завданням роботи є розробка методики розрахунку конструктивних та акустоелектричних параметрів та конструкції лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях з наступними параметрами:

- час затримки 1,8 мкс;
- центральна частота – 50,0 МГц;
- смуга пропускання на рівні – 3,0 дБ - 4,0 МГц;
- привнесені втрати на основній частоті не більше 15 дБ.

## 1. ОГЛЯД НАУКОВО -ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Функціональні пристрої на акустичних хвилях поділяються на дві основні групи відповідно до фізичних принципів їхньої дії: пристрої на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) та на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) [1...12].

До пристроїв на ОАХ належать вузькосмугові (резонаторні) та широкосмугові твердотільні лінії затримки на об'ємних акустичних хвилях, пристрої запам'ятовування частоти, генератори на об'ємних акустичних хвилях. Верхня межа діапазону частот розроблених промислових зразків ліній затримки на ОАХ досягає 16 ГГц. Максимальні значення часу затримки досягають десятків і сотень мікросекунд у режимі рециркуляції, мінімальні – 0,1...0,5 мкс. Сумарні перешкоди складають 3...10 дБ/мкс у дециметровому та 10...20 дБ/мкс у сантиметровому діапазонах. Основна тенденція розвитку ТЛЗ полягає в зниженні втрат, які вносяться, підвищенні діапазону робочих частот і збільшенні придушення “паразитних” сигналів [1, 3, 5].

Втрати ЛЗ на ОАХ складаються з подвоєних втрат перетворення, дифракційних втрат в результаті розширення акустичного променя й втрат на поглинання акустичної хвилі при розповсюдженні по звукопроводу. Дифракційними втратами в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) можна знехтувати, оскільки вони складають величину порядку кількох децибелів. Втрати перетворення в серійних приладах дорівнюють 16...25 дБ, а питоме затухання акустичних хвиль у монокристалічних матеріалах – 0,1...0,2 дБ/мкс на частоті 1 ГГц і 7...8 дБ/мкс для зсувних хвиль або 16...20 дБ/мкс для поздовжніх хвиль на частоті 10 ГГц для магній-алюмінієвої шпинелі і ітрій-алюмінієвого граната.

Один із найважливіших параметрів ЛЗ на ОАХ – рівень придушення “паразитних” сигналів. Наприклад, при малому часі затримки найсуттєвішим є пряме проходження електромагнітного випромінювання з входу на вихід ЛЗ, а також поява багатопролітних сигналів, пов'язаних з попаданням на вихід лінії затримки акустичного сигналу, послідовно відбитого від торців кристалу. Просочування випромінювання придушується зменшенням прохідної ємності, що досягається ретельним екрануванням вхідного та

вихідного перетворювачів або їхнім просторовим рознесенням за рахунок вибору матеріалу звукопровода з більшою швидкістю акустичних хвиль.

Придушення багатопролітних сигналів досягається вибором конструкції ЛЗ та матеріалу звукопровода, які забезпечують зменшення втрат на розповсюдження і задовільне акустичне узгодження перетворювачів з звукопроводом.

З метою дослідження перспективних способів придушення багатопролітних сигналів розроблені ефективні прийоми придушення багатопролітних сигналів за рахунок зниження відбивання акустичного променя від шорсткої поверхні торця звукопровода. Розроблений метод дозволив збільшити придушення багатопролітних сигналів дециметрового діапазону з 1...4 дБ до 10...12 дБ [1].

Акустичні ЛЗ стали основою для розробки генераторів на ОАХ та пристроїв запам'ятовування частоти, що являють собою активні електронні пристрої з зовнішнім зворотнім зв'язком. Основним високодобротним елементом такого генератора є ЛЗ на ОАХ.

Функціональні пристрої на ОАХ знайшли широке застосування в системах бортового й наземного контролю, радіодатчиків висоти і дальності, у приладах визначення, запам'ятовування й відтворення частоти, систем формування й обробки сигналів радіолокаційних станцій (РЛС), а також у вимірювальній апаратурі.

Поверхневі пружні хвилі в діапазоні  $10^{-5} \dots 10^{-1}$  см називаються поверхневими акустичними хвилями (ПАХ), хоча їхні частоти відповідають області ультразвуку [1...12]. Поверхневі акустичні хвилі мають ряд специфічних властивостей. Насамперед, це можливість керувати ними у всіх областях поверхні, де вони розповсюджуються. Їхня амплітуда експоненційно спадає із глибиною, так що 90 % енергії, яка переноситься, зосереджено в шарі глибиною не більш однієї довжини хвилі. Згасання таких хвиль, звичайно, мале, хоча воно залежить від вибору матеріалу, особливо на високих частотах. ПАХ поширюються зі швидкістю 1...5 км/с, тобто приблизно на п'ять порядків нижче, ніж швидкість електромагнітних хвиль, що дозволяє створити на їхній основі інтегральні лінії затримки. Якщо тверде

тіло має п'єзоелектричні властивості, ПАХ, яка поширюється уздовж його поверхні, супроводжується електричним полем. У свою чергу змінні електричні поля, що пронизують п'єзоелектрик, призводять до появи пружних деформацій, що поширюються в його об'ємі. За допомогою різних неоднорідностей на поверхні твердого тіла можна ефективно керувати швидкістю і напрямком поширення хвилі.

Використання поверхневих акустичних хвиль дозволило значно розширити функціональні можливості акустоелектронних пристроїв. Значний інтерес до приладів на ПАХ і прискорений розвиток цієї області досліджень зумовлені відомими особливостями перетворення й розповсюдження ПАХ, а також успіхами фото- та електронно-променевої літографії. В теперішній час ці пристрої представлені широкою номенклатурою функціональних пристроїв: вузькосмужними та широкосмужними фільтрами, ЛЗ на ПАХ, комутуючими пристроями; резонаторами на ПАХ, дисперсійними фільтрами стиснення ЛЧМ-сигналу, пристроями запам'ятовування й визначення частоти, генераторами на ПАХ, синтезаторами частот тощо [1...12].

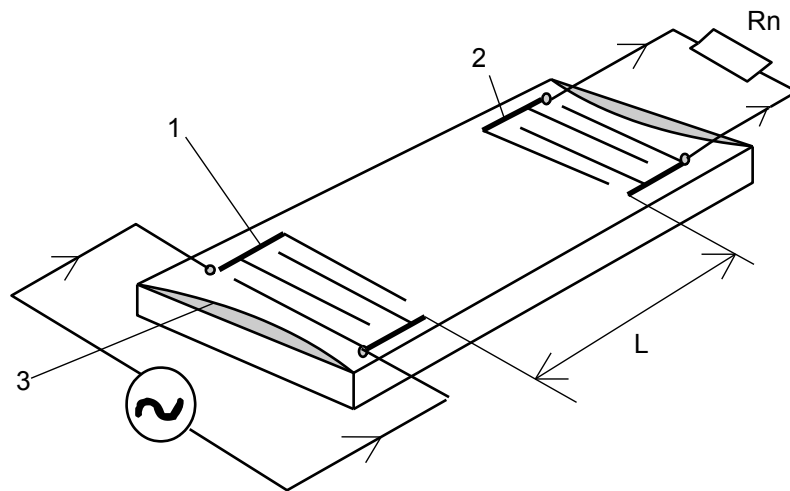
Найпростіша лінія затримки або фільтр на ПАХ складаються з передавального та приймального перетворювачів, які розміщені у більшості випадків на полірованому п'єзоелектричному звукопроводі, що трансформують електричний сигнал в акустичну хвилю на вході і навпаки на виході. У залежності від поставлених вимог у структуру пристрою на ПАХ можуть бути включені додаткові перетворювачі або елементи керування. Оскільки більшість типів перетворювачів ПАХ мають двоспрямованість випромінювання, то для того, щоб уникнути паразитного відбиття на торці звукопроводу наносять поглинаючі покриття. З метою зменшення внесених затухань на вході і виході пристрою на ПАХ застосовуються пасивні й активні узгоджуючі кола. При необхідності звукопровод з перетворювачами і узгоджуючими колами, можуть бути виконані в одному корпусі (Рис.1.1).

Основний внесок у формування активних властивостей пристрою на ПАХ вносять частотно-вибіркові процеси перетворення хвиль на вході і

виході. Форма амплитудно-частотної характеристики (АЧХ) перетворювача визначається законом зміни перекриття електродів або аподизацією. Змінюючи геометрію планарної структури, можна формувати задану АЧХ. Згасання ПАХ при поширенні також є частотнозалежним, але ця залежність для більшості п'єзоелектриків відносно слабка у всьому основному діапазоні частот і її, як правило, не враховують. У результаті функція передачі пристрою на ПАХ визначається в основному поєднанням функцій передачі передавальних і приймального перетворювачів, а також узгоджувачів кіл.

Середня частота пристроїв на ПАХ залежить від періоду електродів перетворювачів. Швидкість ПАХ складає 1...5 км/с, тому нижня границя робочого діапазону залежить від розмірів наявних кристалів, що для частот нижче 5...10 МГц повинні бути надмірно великими. Верхня границя обмежена можливостями технології виготовлення перетворювачів і при використанні звичайної літографії складає 300...500 МГц; застосування електронної літографії розширює ці границі до 1500...2000 МГц [16, 18, 19]. Смуга пропускання обернено пропорційна числу електродів у перетворювачі і може бути реалізована в межах від 0,1 % до 100 %. Смуга пропускання фільтрів на ПАХ-резонаторах може бути зменшена до 0.01 % [8].

Фільтри на ПАХ відносяться до класу фільтрів, що відомі під назвою трансверсальних. Процес фільтрації можна розглядати як процес селекції частоти, котрий найбільш наочно можна відобразити в частотній області. Дійсно, одна смуга частот пропускається фільтром (смуга пропускання), а інші частоти пригнічуються (смуги затримки).



**Рис. 1.1. Загальний вигляд функціонального пристрою на ПАХ:**  
**1 – узгоджуючий пристрій; 2 - перетворювачі; 3 - звукопровод;**  
**4 - акустичний поглинач**

У звичайних лініях затримки або фільтрах, які складаються з індуктивності та ємності, смуги пропускання та затримки формуються за рахунок резонансних ефектів у послідовних та паралельних колах схеми [1].

Резонанси спостерігаються на конкретних частотах, що визначаються ємністю та індуктивністю реактивних елементів. Частотну характеристику необхідного вигляду отримують цілеспрямованою зміною резонансних частот комбінацій цих дискретних елементів. Селекція частоти може також здійснюватися за рахунок процесів, котрі простіше та зручніше реалізуються в частотній області. Сигнал, котрий надходить на вхід пристрою розглядається як хвиля, що поширюється. Фільтрація здійснюється в міру проходження сигналу крізь ряд ліній затримки та додавання відповідних затриманих сигналів. При визначених умовах всі затримані сигнали додаються синфазно (смуга пропускання) або (протифазно). Схема проходження сигналу крізь такий фільтр показана на рис.1.2. Трансверсальний фільтр являє собою багатовідвідну лінію затримки, у якій кожен відвід з'єднаний із спільною вхідною або вихідною шиною [1,4,10,11]. Фільтр має  $N$  відводів, розділених лініями затримки  $D_n$ , причому кожний відвід характеризується ваговим коефіцієнтом  $a_n$ . Вхідний сигнал, що надійшов на фільтр, перш за все помножується на коефіцієнт  $a_1$ , і результат множення проходить на спільний вихід. Потім другий сигнал проходить крізь лінію затримки та помножується на коефіцієнт  $a_2$ , а результат множення додається до сигналу, котрий пройшов крізь перший відвід. У міру проходження вхідного сигналу через

лінії затримки сигнали, що пройшли крізь відводи, додаються і формують таким чином напругу на виході фільтру.

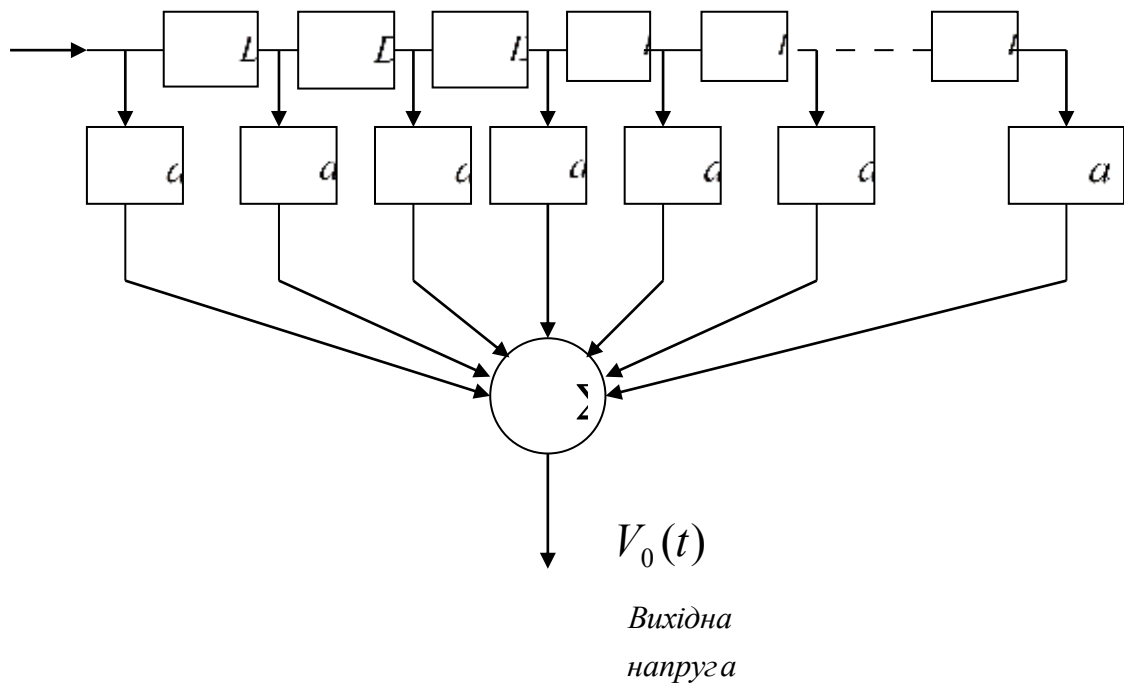


Рис. 1.2. Схема трансверсального фільтру

Трансверсальні фільтри знаходять все більше застосування з розвитком радіолокаційної техніки і техніки зв'язку. Якщо необхідно знайти сигнал, рівень якого нижче рівня шуму, то в цьому допомагає попереднє знання структури необхідного нам сигналу. Наприклад, вузькосмушний фільтр виділяє визначений вузькосмушний сигнал і збільшує його амплітуду в порівнянні із шумом, крім сигналів, що заважають, за рахунок чого підвищується відношення сигнал/шум. Це — добре відомий приклад фільтра, що працює в частотній області. Якщо ж сигнал є цифровим кодом, то відношення сигнал/шум можна збільшити за допомогою узгодженого з цим кодом фільтра, що працює в часовій області і називається кореляційним фільтром. У загальному випадку такі фільтри дозволяють вводити в узгоджений трансверсальний фільтр довгий код і одержувати стиснутий вихідний імпульс. Оскільки енергія вхідного і вихідного сигналу однакова, амплітуда стиснутого імпульсу буде значно вище, ніж у вхідного



сигналу. Шум же передається інакше, оскільки фільтр не узгоджений з ним; за рахунок цього збільшується відношення сигнал/шум.

Інший тип трансверсального фільтра усуває спотворення. Якщо, наприклад, телевізійні сигнал містить у собі паразитні відбиття від будівель, те можна створити зворотній фільтр для обернення процесу перекручування й усунення небажаного відбиття. У лінійній системі фільтр, що усуває небажані відбиття з відомого сигналу, такого, як синхроімпульс телевізійного сигналу, буде також усувати небажані відображення з невідомого телевізійного сигналу, що був підданий аналогічному спотворенню.

Широко використовуються сигнали з внутрішньоімпульсною лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ-сигнали), тобто імпульси приблизно постійної амплітуди, частота заповнення яких змінюються лінійно в часі у визначній частотній смузі [1, 4, 8, 10, 11]. Для таких сигналів можна створити узгоджений фільтр зі стисненням вихідного сигналу аналогічно тому, як було описаний вище для цифрових кодів. Такий фільтр може бути використаний для посилення необхідних ЛЧМ-сигналів над рівнем шуму, збільшуючи, таким чином, відношення сигнал/шум.

Пристрої стиснення ЛЧМ-імпульсів (фільтри ЛЧМ-імпульсів) мають і більш загальні застосування. Наприклад, при введенні в такий фільтр модульованого ЛЧМ-імпульсу на його виході утворюється миттєвий Фур'є-образ функції модуляції. У зв'язку з цим такі фільтри є дуже ефективним інструментом для виконання перетворення Фур'є в реальному часі. Це у свою чергу призводить до створення широкого класу пристроїв, що можуть виконувати перетворення Фур'є для різних типів операцій фільтрації, таких, як виключення небажаних частотних складових при збереженні потрібних компонентів.

Однією з причин широкого використання ЛЧМ-імпульсів у системах локації є можливість одержання сигналів великої тривалості і тієї ж енергії, що й у коротких потужних імпульсів. Інша причина полягає в тому, що доплерівський зсув змінює саме частоту сигналу. Ці частотні зміни, що

можуть бути миттєво виміряні фільтром ЛЧМ-імпульсів, вказують швидкість цілі [1, 5, 10].

Безумовно, практично неможливо проектувати такі складні фільтри лише на основі схем із зосередженими елементами, оскільки для реалізації багатoeлементних складних кодів доведеться використовувати величезну кількість елементів. Для таких фільтрів необхідний більш простий метод виготовлення, переважливо з використанням фотолітографічної методики, що застосовується при виготовленні інтегральних схем. Такі фільтри, придатні для обробки як аналогових, так і цифрових сигналів, з'явилися в останні роки. Спочатку трансверсальні фільтри цього типу були реалізовані у формі пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, що працюють звичайно в діапазоні частот від 10 МГц до 1 ГГц [1, 3, 4, 5, 7].

Поверхневі акустичні хвилі дозволяють здійснити запам'ятовування, затримку і складну паралельну обробку широкосмужних сигналів великої тривалості. Вони працюють на частотах до 500 МГц, а після вживання спеціальних заходів — аж до 2 ГГц, забезпечуючи ширину смуги від 30 до 40% центральної частоти. Відповідна швидкість передачі інформації — порядку сотень мегабіт на секунду. Деякі типи цих пристроїв можуть запам'ятовувати сигнали на час порядку секунд; для поверхневих акустичних хвиль неважко реалізувати багатовідвідні лінії затримки. Відповідним чином підбираючи розміщення та вагові коефіцієнти відводів, можна конструювати широкосмужні та вузькосмужні лінії затримки, фільтри, цифрові фільтри й аналогові фільтри, що пізнають або генерують спеціальні сигнали. Після подальших вдосконалень можливе створення програмованих фільтрів, характеристики яких можна змінювати на власний розсуд.

Більшість операцій функціональної обробки, виконуваних ПАХ-пристроями, можуть також виконувати пристрої на кремнії, але в частотній області, як правило, нижче 5 МГц із відповідно більшою часовою затримкою. Основною перевагою цієї технології є те, що швидкість запису і зчитування

сигналів у цих пристроях можна змінювати, так що заданий сигнал на вході можна розширити або стиснути на його виході, зчитуючи його зі швидкістю, відмінною від тієї, з якою він був записаний.

Іноді використовуються взаємодії між двома типами вхідних сигналів. Наприклад, оскільки будь-який напівпровідниковий пристрій може бути зроблено чутливим до світла, можна створити світлочутливий пристрій, у якому сигнал, що відповідає розподілові інтенсивності світла уздовж пристрою, можна зчитувати як один рядок оптичного зображення. При використанні взаємодій поверхневих акустичних хвиль з напівпровідниками можна виконувати Фур'є-перетворення і проводити іншу функціональну обробку оптичних зображень [10...12].

Нелінійні взаємодії між двома поверхневими акустичними хвилями в ПАХ-пристроях можна використовувати для виконання таких операцій обробки в реальному часі, як згортка й обчислення функції кореляції цих хвиль [5, 10...12]. При цьому один із сигналів може використовуватися в якості опорного, що дозволяє обходитися без трансверсального фільтра з фіксованими характеристиками. У цьому випадку трансверсальний фільтр із довільно змінюваними параметрами може бути легко створений простою зміною опорного коду. Аналогічний пристрій можна реалізувати з використанням двох багатовідвідних ліній затримки, з'єднаних разом; при цьому одна з ліній керує вихідними сигналами з відводів другої лінії, так що сигнали, подані на вхід першої, є опорними для сигналів, що проходять по другій.

Можна також використовувати взаємодію між акустичною хвилею і світловим променем для відхилення останнього, оскільки акустична хвиля формує аналог оптичної дифракційної решітки [10, 11]. Такі методи дозволили створити пристрої, що виконують Фур'є-перетворення й обчислюють функцію кореляції акустичних сигналів або один з одним, або із сигналом, використаним для модуляції світлового пучка. Принцип, що лежить в основі цих пристроїв, може використовуватися для відхилення променя світла в багатонапрямних системах зв'язку або в проекційних телевізійних пристроях.

Спільним для всіх цих пристроїв є наявність трансверсального фільтра – лінії затримки, у якій поширюється акустичний або електричний сигнал і в різних точках якої забезпечується електричний, оптичний або акустичний доступ до цього сигналу. Такі точки утворюють «відводи» лінії затримки. При використанні для цієї мети світлового або акустичного пучка розподіл відводів можна вважати практично безперервним. Якщо ж використовуються

електричні відводи, то доступ до хвилі, що поширюється, є дискретним. В обох випадках, підбираючи амплітудні і фазові вагові коефіцієнти відводів, можна здійснювати різноманітні функціональні перетворення сигналів.

Важливу роль при обробці сигналів у РЛС відіграють пристрої частотної селекції на ПАХ [9...12]. Вони використовуватися як для фільтрації небажаних сигналів, що надходять у пристрій, так і для виділення частотних складових, які необхідні при спектральному аналізі сигналів РЛС. Типовими параметрами смугових фільтрів на ПАХ, що застосовуються в трактах проміжної частоти РЛС для придушення інтерференційних складових, які повинні лежати поза смугою, є: робочий діапазон частот - від 10 МГц до 1,6 ГГц; втрати, що вносяться – 5...25 дБ; придушення паразитних сигналів – 60 дБ (до 100 дБ); смуга пропускання – 0...50%; пульсації по амплітуді - 0,5 дБ; відхилення фазової характеристики від лінійної - 1 град.

Спектральний аналіз сигналів – важлива область застосування пристроїв частотної селекції на ПАХ. Традиційні прилади, що здійснюють спектральний аналіз, часто надто громіздкі й дорогі. Застосування мініатюрних і дешевих пристроїв на ПАХ у таких системах відкриває можливості, які містять, наприклад, вибір сигналу необхідної частоти та визначення доплерівських зсувів у реальному масштабі часу. Блоки фільтрів на ПАХ виготовляються на одній підкладці і забезпечують одночасне розділення сигналів у смузі близько декількох мегагерц зі стовідсотковою імовірністю виявлення.

Пристрої на ПАХ знайшли широке застосування у швидкодіючих системах, де успішно узгоджуються з традиційними компонентами на р-і-п-діодах [10, 11]. Швидкодія таких НВЧ-перемикачів досягає одиниць мікросекунд, ступінь розв'язки сигналів у станах увімкнення-вимкнення більше 100 дБ. Значне застосування ПАХ фільтрів у помножувачах частоти, змішувальних пристроях для виділення необхідних частот з високим ступенем придушення небажаних сигналів.

Значна роль частотно вибіркоким і частотно задавальним пристроям на ПАХ відводиться у вирішенні проблеми синтезу сигналу зі швидкою дискретною перебудовою частоти. Найефективніше це завдання вирішене в пристроях прямого синтезу, у яких гребінчастий спектр, що утворений шляхом маніпуляцій з сигналом опорного генератора, надходить на вхід

блоку ПАХ-фільтрів, а на виході ПАХ-фільтрів виділяються окремі чисті спектральні лінії. Ці пристрої прямого синтезу відрізняються такими особливостями: стабільність частоти і фазова когерентність визначаються одним задавальним генератором, зміни частоти здійснюються дуже швидко (швидкість обмежується тільки швидкодією ВЧ-перемикачів і затримкою фільтрів), метод прямого синтезу з використанням пристроїв на ПАХ виявляється набагато простішим, ніж попередні методи прямого синтезу за рахунок застосування високо вибіркового, компактних фільтрів на ПАХ.

Високий рівень придушення “паразитних” сигналів у такому синтезаторі досягається за допомогою каскадованих ПАХ-фільтрів з високим (не менше 10 дБ) придушенням позасмугових сигналів (дискретних складових у спектрі сигналу) і прийнятним рівнем внесених втрат (менше 30 дБ), виконаних на термостабільних кварцевих підкладках.

Коли потрібна велика кількість робочих частот, замість указаної базової схеми доцільно використати інший підхід. Так, комбінуючи “чисті” вихідні сигнали від декількох, спеціально розрахованих, базових підсинтезаторів (когерентних із задавальним генератором) за допомогою змішувачів і простих широкосмужних фільтрів, можна одержати будь-яку частоту з великої кількості (декількох сотень) частот, що значно перевищують кількість ПАХ-фільтрів у цих підсинтезаторах. Інша можливість полягає в отриманні потрібної сітки робочих місць шляхом послідовного поділу і змішування невеликої кількості вихідних когерентних частот на комутованих виходах ПАХ-фільтрів. Ці методи можна застосовувати в різноманітних варіантах і поєднаннях, добиваючись оптимальних для конкретного застосування характеристик.

Альтернативний метод одержання сигналів зі швидкою перебудовою частоти полягає у використанні багаточастотних програмованих генераторів з комутованими частотнозадаючими фільтрами на ПАХ у колі зворотного зв'язку [3, 6, 9...11]. У таких генераторах за допомогою управління можна переходити від однієї частоти до іншої. Інший підхід полягає в заміні набору ПАХ-фільтрів у колі зворотного зв'язку широкосмужною ЛЗ з програмованими стрибками фази. Крім цього, при введенні до кола зворотного

зв'язку спеціального нелінійного елемента чи при синхронізації ПАХ-генератора з широкосмужною ЛЗ зовнішнім сигналом визначеної частоти може бути забезпечений багатоходовий режим генерації. Багатоходові ПАХ-генератори можуть застосовуватись, наприклад, для формування сітки частот у схемі синтезатора.

Стабільність частоти ПАХ-генераторів визначається стабільністю і добротністю частото задаючого ПАХ-елемента в колі зворотного зв'язку. Типові значення стабільності частоти одномодових ПАХ-генераторів такі: відносна температурна нестабільність  $\sim 10^{-4}$  (в інтервалі температур  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ), у режимі синхронізації до  $10^{-8}$ ; відносна тривала нестабільність  $10^{-6}$  на місяць; короточасна тривала нестабільність частоти  $10^{-9} \dots 10^{10}$  (за 1 сек).

Спектральні характеристики ПАХ-генератора можна поліпшити (приблизно на 10 дБ) при використанні ПАХ-резонаторів і структур з відбиваючими решітками добротністю близько 10000. Характеристики таких генераторів наближаються до характеристик високостабільних кварцевих генераторів з колом помножувачів; вони мають такі переваги, як можливість створення генераторів на частоти аж до 3 ГГц без застосування помножувачів, малі габаритні розміри, низька потужність, що споживається, механічна міцність, відсутність побічних мод, простота здійснення частотної модуляції, слабка чутливість до механічних впливів та акустичних шумів [3, 6, 9].

Переваги акустoeлектронних пристроїв відкривають перспективи їхнього широкого використання не лише в трактах проміжної частоти, але й безпосередньо у вхідних та вихідних трактах надвисокочастотної (НВЧ) радіoeлектронної апаратури. У НВЧ діапазоні сигнали можуть бути безпосередньо введені, оброблені й виведені без додаткових схем перетворення частоти.

Виготовлення ПАХ-пристроїв для роботи в діапазоні понад 1 ГГц пов'язане з відомими технологічними труднощами. Однак, останні досягнення електронно-променевої літографії, а також розповсюдження методів фотолітографії для виготовлення субмікронних перетворювачів електромагнітних сигналів дозволяють впевнено говорити про розширення верхньої межі робочого діапазону частот ПАХ-пристроїв до 6...10 ГГц [11, 12, 16, 18, 19].

Поруч з цим, не припиняється пошук і дослідження нових матеріалів – як монокристалів, так і композиційних структур з високою швидкістю розповсюдження ПАХ та іншими корисними властивостями. Дуже перспективними в цьому розумінні є шаровані структури нітриду алюмінію та окису цинку на сапфірі [16, 17].

Однак, подальше підвищення робочої частоти пристроїв пов'язане перш за все з використанням приповерхневих об'ємних акустичних хвиль (ПОАХ), а також вищих гармонік зустрічно-штирьових перетворювачів. З цією метою розробляються більш технологічні та ефективніші конструкції перетворювачів з компромісними електричними параметрами [13...16]. Значні зусилля спрямовуються на дослідження можливостей поєднання вказаних вище методів.

Так, перехід до застосування ПОАХ у поєднанні з електронно-променевою літографією та матеріалами з високим значенням швидкості акустичних хвиль дозволить підвищити робочу частоту пристроїв до 4,0 ГГц, а також підвищить їхню довговічність та поліпшить робочі характеристики. Подальше розширення функціональних можливостей акустoeлектроніки пов'язане з більш поглибленим вивченням акустoeлектронних явищ у напівпровідникових матеріалах та шарованих структурах. Продовжується вивчення та розробка нових пристроїв підсилення та генерації акустичних та електромагнітних хвиль. Наступним кроком до повної реалізації можливостей використання акустичних хвиль має стати створення монолітних пристроїв, у яких будуть об'єднані властивості п'єзоелектричних матеріалів для перетворення акустичних хвиль, матеріалів з низькими втратами для акустичних ліній передачі та затримки й напівпровідникових матеріалів для підсилення акустичних та електричних сигналів. Реалізація подібних композицій має призвести не тільки до оптимізації характеристик дискретних акустичних пристроїв, але й до забезпечення їхньої узгодженості з різноманітними великими інтегральними схемами та, у кінцевому рахунку, до створення нового покоління пристроїв – монолітних інтегральних акустoeлектронних схем [16]. Практичний інтерес мають одержані результати по збудженню та керуванню параметрами ПАХ на епітаксiальному арсенiді галію з високою концентрацією носіїв заряду.

Важливою віхою на шляху широкого впровадження техніки ПАХ у радіoeлектронні системи різноманітного призначення є розробка перенастроюваних та програмованих ПАХ-пристроїв: ЛЗ, фільтрів, багатовідвідних ЛЗ, узгоджених фільтрів для обробки сигналів зі змінними кодами тощо [1...12]. Перемикання фази виконується за допомогою ВЧ-перемикачів з подальшим інтегруванням вихідних сигналів. Цікавим є застосування для цієї мети матеріалів з керованою швидкістю розповсюдження ПАХ. Такі пристрої можуть бути виконані по гібридній або монолітній технології та знайдуть широке застосування в системах РЛС та системах з розширеним спектром.

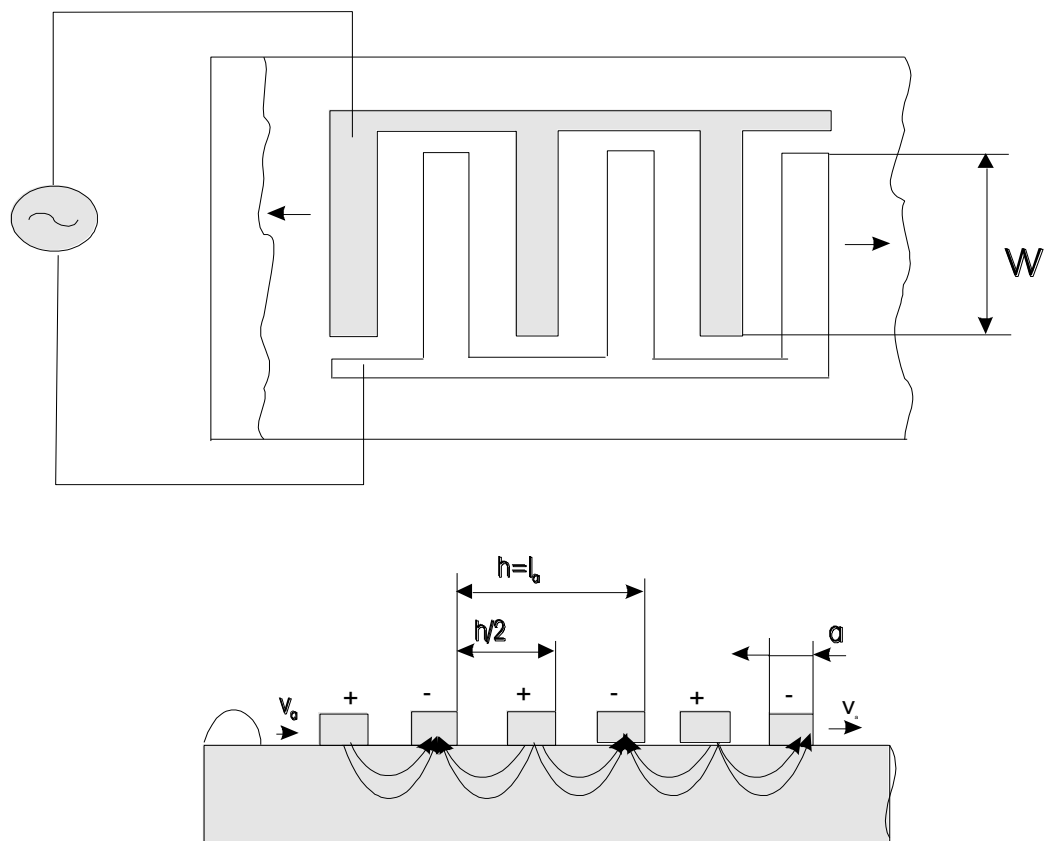
Широке застосування акустoeлектронних пристроїв, безперервне розширення та удосконалення їхніх функціональних можливостей дає

значний техніко-економічний ефект, основними показниками якого є: підвищення точності визначення відстані (висоти) радіолокаційними засобами в 5...10 разів за рахунок стабільності швидкості розповсюдження акустичних коливань у кристалах; зниження габаритних розмірів та маси апаратури в десятки разів за рахунок нижчої (у 50...100 тис. разів) у порівнянні з електромагнітними хвилями, швидкості розповсюдження акустичних хвиль у твердому тілі; підвищення надійності та ефективності робочого застосування систем радіоелектронного оснащення за рахунок можливості здійснення неперервного вбудованого контролю точності роботи радіолокаційних засобів; суттєве зниження часу готовності систем; зниження металоємності виробів; розширення ринку збуту пристроїв.

Однією з переваг ПАХ-пристроїв є те, що вони виготовляються шляхом нанесення тонких металевих плівок на п'єзоелектричну підкладку згідно технології виготовлення інтегральних схем. Це відкриває можливість конструювання пристроїв, що не потребують налаштування, необхідного для індуктивно-ємнісних фільтрів.

Нанесені на п'єзоелектричну підкладку тонкі металеві пластинки утворюють структуру зустрічно-штирьового перетворювача (мал. 1.3), призначеного для збудження поверхневої акустичної хвилі.





**Рис. 1.3. Двохфазний зустрічно-штирьовий перетворювач ПАХ**

Цей перетворювач збуджує поверхневу акустичну хвилю, поле якої експоненційно спадає з глибиною зразка, причому глибина проникнення — порядку довжини хвилі [3...5, 9]. На частоті 40 МГц при швидкості поширення приблизно 3 км/с, глибина проникнення хвилі — порядку 75 мкм. Електроди, що чергуються, зустрічно-штирьового перетворювача підключаються до двох електричних шин (вхідна і вихідна лінії). Як правило, період зустрічно-штирьового перетворювача (ЗШП) (відстань між центрами пари електродів) приблизно дорівнює одній довжині хвилі; наприклад, у телевізійному фільтрі проміжної частоти (ПЧ) 40 МГц період ЗШП дорівнює 75 мкм. Типова ширина електрода — порядку чверті довжини хвилі, тобто в даному випадку 20 мкм.

Пристрої такого типу можуть бути виготовлені з будь-якою заданою амплітудною і фазовою характеристикою в потрібній смузі частот. Їх можна сконструювати із заданим відгуком і навіть із відгуком на спеціальні аналогові або цифрові коди. Такі пристрої можуть працювати в діапазоні частот від 10 МГц до 2 ГГц.

Часовий відгук ПАХ-перетворювача неважко розрахувати на основі простих геометричних міркувань. Якщо відомий часовий відгук, за допомогою методів перетворення Фур'є легко знайти частотний відгук фільтра. У такий спосіб можна досить просто створити трансверсальний фільтр із заданою частотною характеристикою.

Спочатку розглянемо з точки зору фізики простий приклад фільтра з цифровим кодуванням, який можна використовувати як для генерації цифрових кодів, так і як погоджений приймач визначеного цифрового коду.

Розглянемо зустрічно-штировий перетворювач, зображений на рис.1.4. Металеві електроди нанесені на п'єзoeлектричну підкладку, і кожний з'єднаний з однієї з двох вхідних шин. На ту ж підкладку нанесень простий приймальний перетворювач із двох електродів. При поданні напруги на контактні шини на електродах виникають заряди протилежних знаків. Ці заряди у свою чергу збуджують поверхневі акустичні хвилі в п'єзoeлектричному матеріалі. Амплітуда сигналу поверхневої акустичної хвилі, збудженої металевим електродом, має бути пропорційна заряду на електроді, тобто нормальному компоненту електричного поля на поверхні електрода.

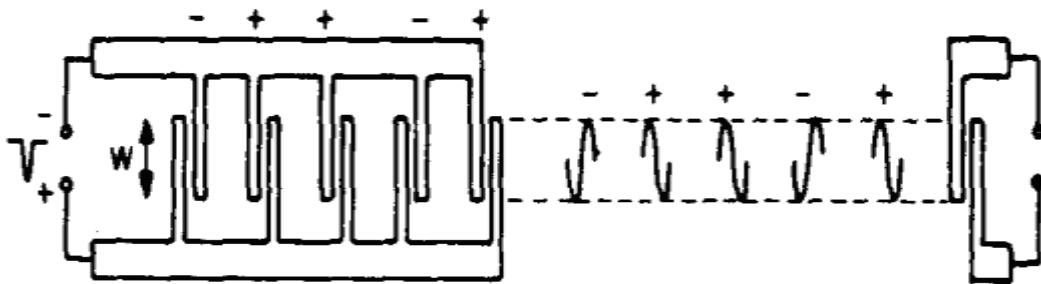


Рис. 1.4. ПАХ-фільтр із цифровим кодуванням.

У зображеній на рис.1.4 конфігурації перша пара електродів у правій частині випромінюючого перетворювача може вважатися поляризованою позитивно, а кожна пари електродів може розглядатися як конденсатор. Тоді при поданні напруги на перетворювач заряд на електроді буде пропорційний

прикладеній напрузі. Заряд на першому електроді першої пари перетворювача збуджує позитивний акустичний імпульс, за яким йде негативний імпульс, котрий збуджується зарядом протилежного знаку іншого електроду цієї ж пари електродів. Відзначимо, що друга пара електродів приєднана до контактних шин протилежного знаку в порівнянні з першою парою. Перший радіочастотний (РЧ) акустичний імпульс проходить лінію затримки у вигляді одного періоду тонального повідомлення; за ним йде другий подібний імпульс протилежного знаку, збуджений другою парою електродів (полярність яких протилежна першій парі). У свою чергу кожна пара електродів збуджує РЧ-імпульс, так що в лінії затримки на ПАХ збуджується кодована послідовність імпульсів, обумовлена геометрією електродів та їхнім електричним з'єднанням [10, 11]. Ця серія РЧ-імпульсів з цифровим кодуванням може бути прийнята приймальним перетворювачем, у результаті чого на виході 1 трансверсального фільтра формується кодований сигнал  $+ - + + -$ , вигляд якого визначається геометричною конфігурацією фільтра. Такий код називається біфазним цифровим кодом, а РЧ-імпульс, або тональне повідомлення, – елементом коду.

Цей самий пристрій може використовуватися і як приймач кодованого сигналу. У цьому випадку заряд, що виникає на електроді вихідного перетворювача, пропорційний амплітуді акустичного сигналу, а вихідна напруга перетворювача – цьому заряду. Якщо на лівий перетворювач (див. рис. 1.4) подається електричний сигнал  $+ - + + -$ , що відповідає оберненому в часі цифровому коду, то перший елемент цього коду, випромінюваний лівою парою електродів, є позитивним РЧ акустичним імпульсом, що виникає за рахунок того, що на «негативний» перетворювач подається РЧ електричний імпульс негативної полярності. Цей акустичний імпульс приходить на приймальний перетворювач у той же час, що і другий елемент коду, випромінюваний другою парою електродів. Оскільки вхідний код відповідає коду перетворювача, то всі елементи коду приходять на приймальний перетворювач одночасно і перетворюються в електричні сигнали однієї

поляриності. Ці сигнали додаються, у результаті чого формується сигнал амплітудою, у п'ять разів більшою, ніж від одиничної пари випромінюючих електродів.

Якщо ж на лінію затримки подається інший сигнал, що має послідовність позитивних і негативних РЧ-імпульсів, що відрізняється від заданої, то в жоден з моментів часу він не відповідатиме поляриності всіх простих перетворювачів (пари електродів), що складають випромінюючий перетворювач. Іншими словами, сигнал і відгук фільтра незкорельовані, внаслідок чого вихідний сигнал буде менший по амплітуді. Це – простий приклад здатності трансверсального фільтра до розпізнавання образів і до вибору сигналу з заданим кодом із всіх інших сигналів. Так званий ортогональний набір кодів визначається як такий набір, для якого вихідний сигнал має одиничну амплітуду при узгодженості кодів і амплітуду в  $N$  разів більшу для узгоджених кодів довжиною в  $N$  елементів.

У загальному випадку можна показати, що мінімальна ширина вихідного імпульсу  $\tau$  визначається шириною смуги  $B$  системи і дорівнює приблизно  $\tau = 1/B$ . Якщо  $T$  – довжина кодованого імпульсного повідомлення, ті  $\tau$  – довжина одного елемента коду або імпульсу мінімальної довжини (у нашому випадку це буде імпульс, що відповідає сигналу від однієї пари електродів або одного елемента). Відношення довжини вхідного імпульсу до довжини вихідного дорівнює, отже,  $T/\tau$  або приблизно  $TB$ . Це – добуток часу затримки фільтра на смугу пропускання, названий коефіцієнтом стиснення імпульсу. Амплітуда вихідного імпульсу збільшується порівняно з амплітудою вхідного в те ж число разів; цей коефіцієнт характеризує виграш у відношенні сигнал/шум при обробці сигналів. Відзначимо, що для цифрового коду коефіцієнт стиснення імпульсу в  $N$  разів більше числа елементів коду і  $N \approx TB$ .

Для більш повного розуміння ідеї стиснення імпульсу розглянемо сигнал з цифровим кодуванням довжиною в  $N$  елементів (кожний має

значення  $\pm 1$ ), що надходить на вхід узгодженого фільтра в присутності випадкового коду (шуму) [10]. На виході узгодженого фільтра формується одиничний імпульс тривалістю  $\tau$ . Отже, його амплітуда буде збільшена в  $N$ , а пікова вихідна потужність – у  $N^2$  разів. Дуже довгий випадковий шумовий сигнал (наприклад, неузгоджений цифровий код) не буде корелювати з відгуком узгодженого фільтра, і елементарні сигнали, що складають вихідний сигнал, не будуть додаватися у фазі. З іншого боку, потужність шуму на виході фільтра буде в  $N$  раз більше, ніж від одиничного елементу випадкового коду або шумового сигналу, тому що приймання ведеться поелементним фільтром і, отже, потужності додаються на кожному елементі фільтра. Тому середня вихідна потужність шуму випадкового коду буде в  $N$  раз більше, ніж одиничного елемента, що збільшить пікове за потужністю відношення сигнал/шум на виході в  $N^2/N$  раз, а це дорівнює коефіцієнту стиснення імпульсу  $N = T/\tau$ .

Характеристики пристроїв на ПАХ сильно залежать від конструктивних особливостей зустрічно-штирових перетворювачів. Однорідний перетворювач з постійною довжиною електродів і однаковою відстанню між парами електродів зображено на рис.1.3. Припустимо, що ширина електрода дуже мала порівнянню з довжиною хвилі. У [2...5] показано, що за таких міркувань

$$\frac{\Delta\omega(3\text{дБ})}{\omega_0} = \frac{1}{n}.$$

Спадання характеристики на 3,0дБ відбувається в точках  $\Delta\omega(3\text{дБ})/\omega_0=0,89/n$ , що відображено на Рис.1.5.

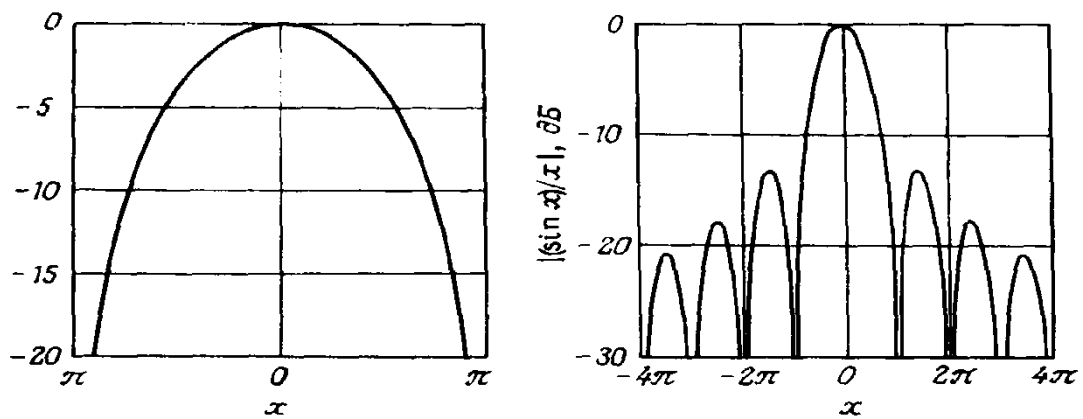


Рис. 1.5. Графіки функції  $|(\sin x)/x|$  у децибелах

Очевидно, що якщо певним чином змінити довжини електродів і відстань між ними, то можна одержати будь-яку форму відгуку перетворювача. Така зміна довжини електродів називається аподизацією. Наприклад, при однаковій відстані між електродами, якщо їхня довжина змінюється пропорційно  $|(\sin x)/x|$ , а полярність електрода залежить від знаку функції  $(\sin x)/x$ , то повний заряд на електроді буде змінюватися як  $(\sin x)/x$ . Вихідним сигналом перетворювача буде Фур'є-образ сигналу збудження електродів, унаслідок чого частотна характеристика буде прямокутною. Складність, звичайно, полягає в тому, що теоретично довжина перетворювача повинна бути нескінченною. Більш того, чим ближче електроди до краю перетворювача, тим меншу довжину вони повинні мати; при цьому основними стають процеси дифракції акустичної хвилі.

Найбільш очевидним, на перший погляд, методом аподизації є зовнішнє зважування. За допомогою зовнішніх шунтів (резистивних або ємнісних) між парами сусідніх електродів задаються різниці потенціалів, пропорційно амплітуді відповідного елементу імпульсного відгуку. Інтенсивність електричного поля між будь-якими сусідніми протифазними електродами визначається лише різницею їхніх потенціалів, оскільки апертура перекриття всіх електродів постійна. Таким чином, інформація про закон модуляції “записана” в інтенсивності або щільності акустичного потоку. У цьому випадку вихідний перетворювач може мати довільну апертуру. Незалежно

від апертури сигнал на виході буде відповідати імпульсному відгуку вхідного перетворювача (враховуючи вплив кінцевої смуги пропускання вихідного). Ця важлива властивість зовнішнього зважування дозволяє поєднувати в спільному акустичному потоці одразу два аподизовані перетворювачі, значно збільшуючи пригнічення сигналів поза смугою пропускання [1, 3, 6, 8, 9...12].

У методі безпосереднього зважування здійснюється зміна перекриття (довжини) електродів у відповідності з заданою імпульсною характеристикою. Цей вид зважування може розглядатися як амплітудно-імпульсна модуляція сигналу. Перевагою цього методу є висока роздільна здатність, оскільки зважування може відбуватися безперервно в широкому діапазоні.

Відомо, що для однорідного ЗШП амплітудно-частотна характеристика має вигляд  $\text{Sin}X/X$  [1, 3, 6, 8, 9...12] і рівень бічних пелюстків дуже високий:  $-13,46$  дБ. Однак, уже для фільтра, що складається з двох однакових однорідних ЗШП, рівень бічних пелюстків спадає до  $-27$  дБ, що є наслідком згладжування імпульсної характеристики до країв. Такий результат підказує шлях зниження бічних пелюстків у фільтрах на ПАХ – згладжування імпульсної характеристики фільтра до країв, тобто множення її на деяку спадаючу до країв функцію, що зважує, названу функцією аподизації чи аподизація імпульсної характеристики. Цей метод широко застосовується в теорії цифрових фільтрів. Досить часто розробляється фільтр типу «косинус на п'єдесталі», для якого функцію аподизації беруть у вигляді функції Хеммінга [1, 4, 8, 10]:

Крім аподизації за Хеммінгом, можна використовувати й аподизацію Чебишева, Кайзера,  $\text{Sin}X/X$  та ін., що дозволяють виконувати синтез фільтрів

на ПАХ з характеристиками, що задовольняють вимогам сучасної радіoeлектронної апаратури.

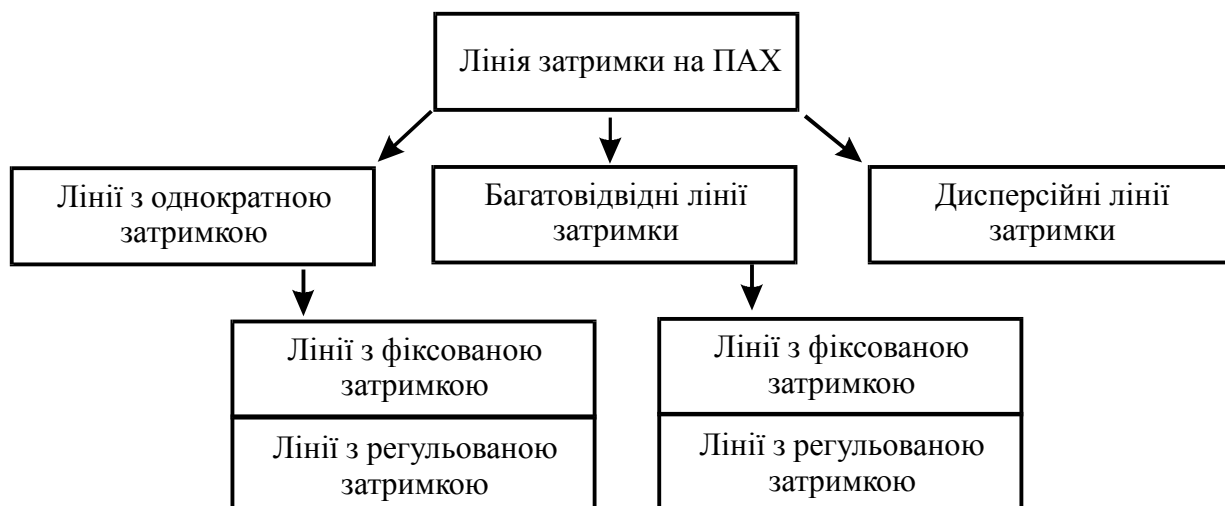
Однією з головних проблем, властивих методу зважування зміною довжини електродів, є точне відтворення малих амплітуд, що вимагається для реалізації затухання в смузі загородження понад 50...60 дБ. Це обмеження пов'язано з дією ефекту дифракції пучка ПАХ від малих апертур. Спотворення ж амплітудного і фазового фронтів ПАХ в аподизованому ЗШП практично виключають можливість використання двох подібних ЗШП в одному фільтрі з метою перемноження їхніх функцій передачі та послаблення вимог для вхідного перетворювача. Усунути цю проблему дозволяє використання іншого ЗШП із порівняно плоским фронтом випромінюваних ПАХ.

Відбиття від багатеелектродної структури можна зменшити, застосувавши структури ЗШП з розщіпленими електродами, з зломом електродів поза зоною перекриття або секціоновані ЗШП з періодичним проріджуванням електродів. З метою зменшення втрат, обумовлених двонаправленістю випромінювання ПАХ, використовують однонаправлені ЗШП, одна з половин якого зміщена на половину довжини хвилі і є відбивачем для оберненої ПАХ.

Значно розширити смугу пропускання в порівнянні з еквідистантними ЗШП можливо шляхом зважування просторового періоду електродів уздовж чи впоперек напрямку поширення ПАХ. Зважування при вибіркового вилученні електродів здійснюється завдяки перерозподілу зарядів між електродами, що виникло при цьому. Метод аналогічний комбінації часово-імпульсної та широтно-імпульсної модуляції сигналу. Застосування тих чи інших конструкцій ЗШП з різними методами зважування визначається колом вимог до параметрів пристроїв на ПАХ.



Класифікація ЛЗ на ПАХ приведена на рис.1.6.



**Рис.1.6. Класифікація ліній затримки на ПАХ**

В таблиці № 1.1 приведено основні характеристики деяких ліній затримки на ПАХ, що виробляються серійно.

**Таблиця 1.1.**

**Параметри ліній затримки на ПАХ**

Найменування параметрів	Тип лінії затримки		
	ЛЗІПВ-1	ЛЗІПВ-2	ЛЗІПВ-3
Номінальна частота, МГц	$15 \pm 0,2$	$15 \pm 0,2$	$15 \pm 0,2$
Смуга пропускання по рівню -6 дБ, МГц, не менше	6,0	6,0	6,0
Час затримки між вхідним сигналом і сигналом з першого відводу, мкс	$2 \pm 0,05$	$3 \pm 0,05$	$3,2 \pm 0,01$
Внесене згасання на останньому відводі, дБ, не більше	40	40	40

Температурний коефіцієнт затримки, $1/^{\circ}\text{C}$ , не більше	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$

## В И С Н О В К И

1.Приведена порівняльна характеристика функціональних пристроїв на об'ємних і поверхневих акустичних хвилях. Дана класифікація ліній затримки та детально розглянуті найбільш характерні конструктивні реалізації ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.

2.Функціональні можливості акустoeлектронних пристроїв значно розширились з переходом від простих приладів на об'ємних акустичних хвилях до значно складніших пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, які знаходять широке використання для генерації й обробки високочастотних сигналів в електронних системах різноманітного призначення.

3.Великий інтерес до пристроїв на поверхневих акустичних хвилях зумовлено відомими особливостями перетворення й розповсюдження ПАХ, а також успіхами фото- та електронно-променевої літографії.

4.Функціональні пристрої на ПАХ в теперішній час представлені широкою номенклатурою пристроїв: вузькосмуговими та широкосмуговими фільтрами, лініями затримки, комутуючими пристроями, резонаторами на ПАХ, дисперсійними фільтрами стиснення ЛЧМ-сигналу, пристроями запам'ятовування й визначення частоти, генераторами на ПАХ, синтезаторами частот та рядом інших пристроїв.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 2.1. Математична модель лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях

При розробці ЛЗ на ПАХ з вузькими смугами пропускання ( $\Delta f_3/f_0=1,0\dots5,0\%$ ) спостерігаються значні відмінності результатів, одержаних при розрахунках, від даних експерименту. Однією з головних причин цих відмінностей є багаторазові відбивання у багатоелектродних структурах перетворювачів. Для побудови вузькосмужних ЛЗ на ПАХ використовуються різноманітні конструкції зустрічно-штирових перетворювачів: однорідні та секціоновані ЗШП із проріджуванням електродів, ЗШП з чвертьхвильовими відбивачами, ЗШП з розчіпленими електродами та інші [1...16].

Найбільш доцільним є побудова математичної моделі ЛЗ на ПАХ на основі моделі  $\Delta$  - джерел, у якій припускається, що електроди ЗШП є дискретними джерелами акустичної (електричної) енергії, що описуються  $\Delta$ -функціями, заданими на краях кожного штиря. Для спрощення розрахунку два  $\Delta$ -джерела однієї полярності, що належать одному електроду або зазору, об'єднують в один, що знаходиться в центрі електроду або зазору. У залежності від значення коефіцієнту електромеханічного зв'язку у реальних п'єзоелектриках превалює тангенціальна або нормальна складова електричного поля [4]. Тому, можна вважати, що ПАХ у п'єзоелектриках з слабким зв'язком (кварц  $\text{SiO}_2$ ) поверхнева акустична хвиля збуджується гармонічними  $\Delta$ -джерелами, розміщеними у центрах зазорів ЗШП, а в п'єзоелектриках з сильним зв'язком (ніобат літію- $\text{LiNbO}_3$ , германат вісмуту –  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , силікат вісмуту –  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , оксиду цинку –  $\text{ZnO}$ , нітрид алюмінію –  $\text{AlN}$ ) -  $\Delta$ -джерелами, розміщеними у центрах електродів. Знак сумарного  $\Delta$ -джерела визначається знаком електричного поля в к-тому зазорі або на к-тому електроді, а фаза – координатою електроду або зазору.

У ролі вихідної моделі розглянемо функціональну схему ЛЗ на ПАХ (рис.2.1), яка містить п'єзоелектричний звукопровід 1 із поглиначами ПАХ 2 та 3, необхідних для створення режиму біжучих акустичних хвиль, вхідний і вихідний зустрічно-штирові ЗШП 4 та 5.

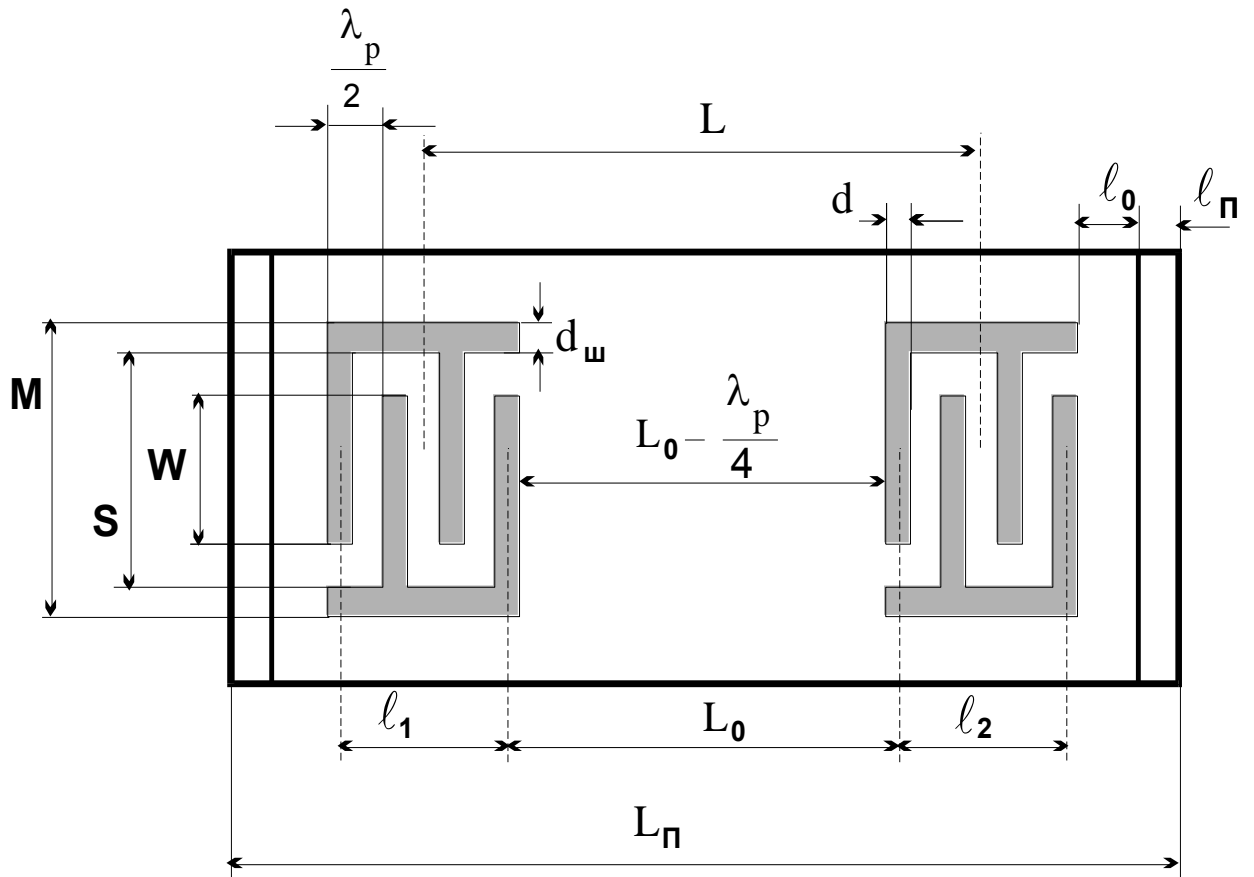


Рис. 2.1. Топологія лінії затримки на ПАХ

При подаванні на вхідний ЗШП електричного сигналу  $u_{\text{вх}} = U_{\text{м}} \exp j(2\pi ft + \varphi_0)$  у прилеглих до електродів ділянках п'єзоелектричного звукопроводу за рахунок п'єзоефекту виникають механічні напруги, що призводять до збудження ПАХ, що розповсюджуються в різні сторони. ПАХ, яка генерується вхідним ЗШП, можна представити як суму хвиль  $a_k$ , що створені кожним окремим  $\Delta$ -джерелом. Всі електроди, приєднані до загальної шини, збуджуються однією й тією ж напругою і тому створюють хвилі з однією й тією ж фазою. Однак, оскільки електроди розміщені вздовж ЗШП, то по досягненню кінця ЗШП кожна з них має свій фазовий зсув.

Нехтуючи ефектом кінечної ширини електродів при рівності ширини електроду й зазору, при якій ефективність ЗШП максимальна, і кількості електродів  $N \gg 1$  на основі моделі дискретних  $\Delta$ -джерел ПАХ на виході першої секції вхідного перетворювача можна представити [4...5]:

$$a_m = \sum_{k=1}^{n_1} a_k = \gamma_1 u_{\text{вх}} \sum_{k=1}^{n_1} \exp j(k-1)\pi\delta \quad (2.1)$$

де  $a_k = \gamma_1 u_{\text{вх}} \exp j(k-1)\pi\delta$  - ПАХ, яка збуджується  $k$ -тим  $\Delta$ -джерелом ( $k=1, 2, \dots, n_1$ );  $\gamma_1$  - коефіцієнт електромеханічного перетворення електричного сигналу в ПАХ;  $\delta = (f_0 - f)/f_0 = (\lambda - \lambda_0)/\lambda$  - відносна частотна розстрочка;  $\lambda_0 = V/f_0$ ;  $V$ -фазова швидкість ПАХ;  $f_0$  та  $\lambda_0$  - резонансна частота та довжина хвилі ПАХ ( $\lambda_0 = \lambda_p$ , де  $\lambda_p$ -період ЗШП).

Після виконання операції додавання у співвідношенні (2.1) поверхневу акустичну хвилю на виході вхідного ЗШП можна подати у вигляді:

$$a = \gamma_1 u_{\text{вх}} K_1 \exp(j\psi_1), \quad (2.2)$$

$$\text{де} \quad K_1 = \sin(n_1 \frac{\pi}{2} \delta) / \sin(\frac{\pi}{2} \delta);$$

$$\psi_1 = (n_1 - 1) \frac{\pi}{2} \delta.$$

Набігання фази ПАХ на ділянці звукопроводу між перетворювачами визначається співвідношенням:

$$\psi_z = -\frac{2\pi}{\lambda} L_0 = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot N \cdot \frac{\lambda_p}{2} = -\pi \frac{\lambda_p}{\lambda} N = -\pi N(1 - \delta) \quad (2.3)$$

де  $N$ - число напівдовжин ПАХ, що вкладаються на частині звукопроводу з довжиною  $L_0$ , тобто  $L_0 = N \frac{\lambda_0}{2} = N \frac{\lambda_p}{2}$ .

Тоді ПАХ, що прийшла до вихідного ЗШП, можна подати у вигляді співвідношення:

$$a_z = \gamma_1 u_{\text{вх}} K_1 \exp j(\psi_1 + \psi_z) \quad (2.4)$$

Використовуючи модель  $\Delta$ -джерел для вихідного ЗШП, вихідний електричний сигнал ЛЗ на ПАХ має вигляд:

$$u_{\text{вих}} = \sum_{q=1}^{n_2} u_q = \gamma_2 a_z \sum_{q=1}^{n_2} \exp j(q-1)\pi\delta, \quad (2.5)$$

де  $n_2$  – число дискретних джерел вихідного перетворювача ( $q = 1, 2, \dots, n_2$ );

$\gamma_2$  – коефіцієнт електромагнітного перетворення ПАХ в електричний сигнал.

Після виконання операції додавання одержимо:

$$u_{\text{вих}} = K u_{\text{вх}} \exp j\psi = \gamma_1 \gamma_2 u_{\text{вх}} K_1 K_2 \exp j(\psi_1 + \psi_2 + \psi_z), \quad (2.6)$$

$$\text{де } K_2 = \sin\left(n_2 \frac{\pi}{2} \delta\right) / \sin\left(\frac{\pi}{2} \delta\right);$$

$$\psi_2 = -(n_2 - 1) \frac{\pi}{2} \delta.$$

Комплексний коефіцієнт передачі ЛЗ на ПАХ:

$$\hat{K} = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = K \exp j\psi, \quad (2.7)$$

$$\text{де } K = \gamma_1 \gamma_2 K_1 K_2 = \gamma_1 \gamma_2 \frac{\sin(n_1 \frac{\pi}{2} \delta)}{\sin(\frac{\pi}{2} \delta)} \cdot \frac{\sin(n_2 \frac{\pi}{2} \delta)}{\sin(\frac{\pi}{2} \delta)} - \text{модуль коефіцієнта передачі}$$

(амплітудно-частотна характеристика ЛЗ на ПАХ);

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_z = -\pi N + \left[ \pi N - \frac{\pi}{2} (n_2 - n_1) \right] \delta - \text{фаза коефіцієнта передачі}$$

(фазочастотна характеристика ЛЗ на ПАХ).

При резонансі  $f=f_0$ ,  $\lambda=\lambda_0=\lambda_p$  ( $\delta = 0$ ) і комплексний коефіцієнт передачі (2.7) ЛЗ на ПАХ набуває вигляду:

$$\hat{K}_0 = \gamma_1 \gamma_2 n_1 n_2 \exp j\psi_0, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \psi_0 = -\pi N.$$

Тоді нормований комплексний коефіцієнт передачі визначається співвідношенням:

$$\hat{F} = \frac{\hat{K}}{\hat{K}_0} = F \exp j\psi, \quad (2.9)$$

де  $F$  та  $\psi$  - амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики ЛЗ на ПАХ, які визначаються за формулами:

$$F = F_1 F_2; \quad (2.10)$$

$$F_1 = \frac{1}{n_1} \sin\left(n_1 \frac{\pi}{2} \delta\right) / \sin\left(\frac{\pi}{2} \delta\right); \quad (2.11)$$

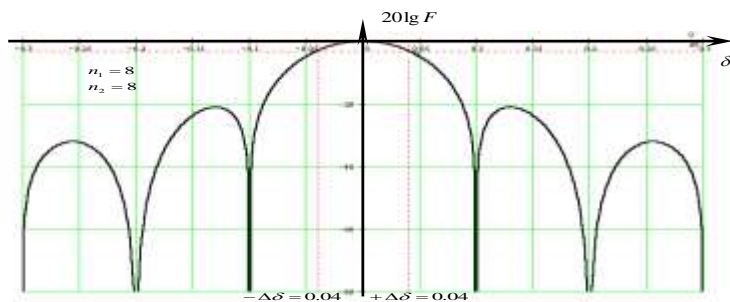
$$F_2 = \frac{1}{n_2} \sin\left(n_2 \frac{\pi}{2} \delta\right) / \sin\left(\frac{\pi}{2} \delta\right); \quad (2.12)$$

$$\psi_F = \psi - \psi_0 = \left[ \pi N - \frac{\pi}{2} (n_2 - n_1) \right] \delta \quad (2.13)$$

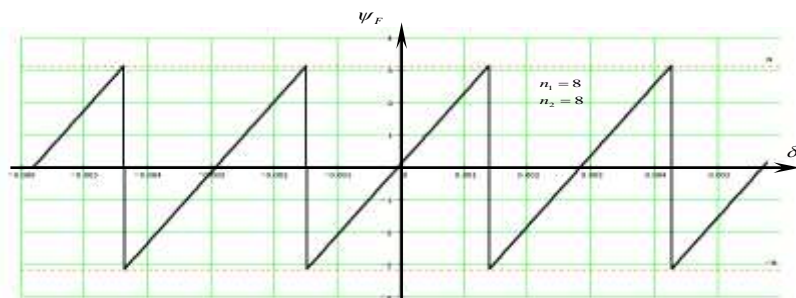
Використовуючи рівняння (2.10...2.12), для заданих значень  $n_1$  та  $n_2$  отримаємо співвідношення для визначення смуги пропускання ЛЗ на ПАХ на рівні  $-3$  дБ, тобто:

$$20 \lg F = -3 \text{ дБ}. \quad (2.14)$$

Графіки для амплітудно-частотної (2.10)...(2.13) та фазочастотної характеристик (2.13) лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях при  $n_1 = 8$ ,  $n_2 = 8$  приведено на рис. 2.2 та 2.3.



**Рис.2.2. Амплітудно-частотна характеристика ЛЗ на ПАХ при  $n_1 = n_2 = 8$**



**Рис.2.3. Фазочастотна характеристика ЛЗ на ПАХ при  $n_1 = n_2 = 8$**

## 2.2. Методика розрахунку конструктивних параметрів лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях

З усіх відомих способів збудження і прийому ПАХ основним і найрозповсюдженішим є спосіб, заснований на п'єзоелектричному ефекті, а саме на використанні зустрічно-штирових перетворювачів, у яких відбувається взаємне перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю. Тому однією з основних характеристик п'єзоелектричних матеріалів є коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $K_c^2$ , що визначається тензорами модулів пружності, п'єзоелектричних і діелектричних сталих. Для ПАХ величина  $K_c^2$  з високою мірою точності дорівнює подвоєній відносній різниці швидкостей на вільній та металізованій поверхні п'єзоелектрика ( $K_c^2 = 2\Delta V/V$ ). Зазвичай намагаються використати п'єзоелектричні кристали з якомога більшим  $K_c^2$ , однак для вузькосмужних пристроїв на ПАХ надто високе значення цього коефіцієнту може бути небажаним, бо призводить до спотворення амплітудно-частотної та імпульсної характеристик пристрою.

Робоча частота пристрою  $f_0$  визначається фазовою швидкістю  $V$ . При виборі матеріалів для пристроїв на ПАХ необхідно також знати такі характеристики, як температурний коефіцієнт часу затримки (ТКЗ), кут відхилення потоку енергії від напрямку розповсюдження хвилі ( $\alpha$ ) і залежність кута відхилення потоку енергії від напрямку розповсюдження ( $\gamma$ ), який визначає дифракційні спотворення. Ідеальним є матеріал з нульовим ТКЗ, нульовим  $\alpha$  і  $\gamma$  порядку  $-1$ . За умов виконання останньої умови забезпечуються мінімальні дифракційні спотворення. Параметром п'єзоелектричного кристалу, що визначає узгодження перетворювача із зовнішніми електричними схемами, є ефективна діелектрична проникливість  $\epsilon_p$ , що визначається із співвідношення  $C=(\epsilon_p+1)C_0/2$ , де  $C_0$ —ємність електродної структури перетворювача у вакуумі. У низькочастотній області можна використовувати п'єзоелектрик з будь-якою



ефективною діелектричною проникливістю. Однак в ультрависокочастотному діапазоні доцільно використовувати п'єзоелектричні кристали з малим значенням  $\epsilon_r$ , бо при цьому зростає добротність узгоджувальних кіл і зменшуються втрати на перетворення ПАХ. Більшість пристроїв на ПАХ виготовляють з  $\alpha$ -кварцу, ніобату літію, танталату літію, германату вісмуту та структур на основі п'єзоелектричної плівки окису цинку. Перший має хорошу температурну стабільність, але може використовуватися тільки для пристроїв з вузькою шириною смуги пропускання через малу величину  $K_c^2$ . У ніобату літію більше значення  $K_c^2$  ( $0,04 \div 0,05$ ) і великий додатній ТКЗ. Танталат літію має кращу температурну стабільність у порівнянні з ніобатом літію, але коефіцієнт  $K_c^2$  у нього в 4 рази менший. Германат вісмуту має малу фазову швидкість ПАХ, однак ТКЗ значно вищий у порівнянні з ніобатом літію.

Використання п'єзоелектричних плівок окису цинку (ZnO) дозволяє створювати мікроелектронні пристрої, у яких акустoeлектронні й електронні елементи розташовуються на одній підкладці, що значно зменшує масу, габарити і вартість виробів. Однак, у даний час технологічні процеси створення структур на основі плівки окису цинку знаходяться на стадії освоєння у виробництві. У таблиці № 2.1 наведено основні параметри п'єзоелектричних матеріалів, які необхідні для розрахунку ПАХ пристроїв. Аналіз параметрів звукопроводів показує, що при розробці ЛЗ на ПАХ, яка передбачається при виконанні дипломного проекту, доцільно використовувати ніобат літію YZ-зрізу, який має велике значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку та малий кут відхилення потоку енергії від напрямку розповсюдження хвилі. Для забезпечення заданої смуги пропускання ЛЗ на ПАХ використаємо у ролі перетворювачів ПАХ вхідний і вихідний еквідистантні зустрічно-штирові перетворювачі з різним числом електродів. Результати численних розрахунків АЧХ такої ЛЗ,

наведені у розділі 2.1 і на рисунках 2.2-2.17, показують, що амплітудно-частотна характеристика ЛЗ на ПАХ залежить від конструктивних параметрів зустрічно-штирових перетворювачів.

**Таблиця № 2.1**

**Характеристики матеріалів, що використовуються в пристроях на  
ПАХ**

Матеріал	Орієнтація кристалу	Напрямок розповсюдження	Швидкість ПАХ - $V$ , км/с	Втрати при $f=1\text{ГГц}$ , дБ/мкс	Температура на нестабільність, $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку, $K_c^2$
Ніобат літію	Y	Z	3.488	1.6	85	0.045
	Y+41.	X	4		96	0.0554
	5°	X	3.79		77	0.0052
	Z	Z	3.48		93	0.0504
	X					
П'єзокварц	ST	X	3.156	4	3	0.0017
	Y	X	3.17		24	0.002
	Y-20°	X	3.2		32	0.0024
		Y	3.2		35	0.0019
Германат вісмуту	001	110	1.68	2.5	115	0.0144
	110	001	1.62		140	0.0074
Танталат літію	Z	Y	3.31	-	67	0.0093
	X	Z	3.22		36	0.0069
	Y	Z	3.22		37	0.0074

Виходячи з вище викладеного, розрахунок конструктивних параметрів ЛЗ на ПАХ на підкладці із ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$  YZ-зрізу (Рис.2.1) виконаємо використовуючи формули (2.1-2.14):

1. Вибираємо конструкції вхідного та вихідного ЗШП: еквідистантні ЗШП з однаковим числом електродів  $n_1 = n_2 = n$ , матеріал звукопроводу – ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$  YZ-зрізу.

2. Знаходимо число електродів  $n$  зустрічно-штирового перетворювача, розв'язуючи рівняння (2.14) для смуги пропускання 4,0 МГц, тобто  $20 \lg F = -3,0$  дБ, де  $F = \sin(n\pi\delta/2)/(n\pi\delta/2)$  (рис.2.2). Для  $\Delta f = 4,0$  МГц знаходимо  $n = 8$ .

3. Період зустрічно-штирового перетворювача  $\lambda_p$  і резонансна довжина ПАХ  $\lambda_0$  для заданої центральної частоти  $f_0$  визначається формулою:

$$\lambda_p = \lambda_0 = \frac{V}{f_0} = \frac{3488 \text{ м/с}}{50 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 69,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 69,8 \text{ мкм}.$$

4. Ширина електродів  $d_x$  і ширина зазору  $d_s$  між електродами:

$$d_x = d_s = \frac{\lambda_p}{4} = \frac{69,8}{4} = 17,45 \text{ мкм}.$$

5. Довжина вхідного зустрічно-штирового перетворювача:

$$l_{\text{вх}} = l_1 + \frac{\lambda}{4} = (n_1 - 1) \frac{\lambda_p}{2} + \frac{\lambda_p}{4} = (8 - 1) \frac{69,8}{2} + \frac{69,8}{4} = 261,75 \text{ мкм}.$$

6. Довжина вихідного зустрічно-штирового перетворювача:

$$l_{\text{вих}} = l_2 + \frac{\lambda}{4} = (n_2 - 1) \frac{\lambda_p}{2} + \frac{\lambda_p}{4} = (8 - 1) \frac{69,8}{2} + \frac{69,8}{4} = 261,75 \text{ мкм}.$$

7. Відстань між центрами перетворювачів  $L$ , яка забезпечує необхідну затримку високочастотного сигналу:

$$L = V \cdot \tau = 3488 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} = 6278,4 \text{ мкм}.$$

8. Знаходимо відстань  $L_0$  згідно рис.2.1:

$$L_0 = L - \frac{(l_1 + l_2)}{2} = 6278,4 - \frac{(244,3 + 244,3)}{2} = 6034 \text{ мкм} = 6,034 \text{ мм},$$

$$\text{де } l_1 = (n_1 - 1) \frac{\lambda_p}{2} = (8 - 1) \frac{69,8}{2} = 244,3 \text{ мкм};$$

$$l_2 = (n_2 - 1) \frac{\lambda_p}{2} = (8 - 1) \frac{69,8}{2} = 244,3 \text{ мкм}.$$

9. Довжина підкладки звукопроводу:

$$L_{\Pi} = L_0 + l_1 + l_2 + \frac{\lambda_p}{4} + 2(l_0 + l_{\Pi}) = 6034 + 244,3 + 244,3 + 17,45 + 2(4000 + 2730) = 20000 \text{ мкм} = 20,00 \text{ мм}$$

,

де  $l_0 = 4000 \text{ мкм}$  - відстань від ЗШП до поглинача ПАХ;  $l_{\Pi} = 2730 \text{ мкм}$  - довжина поглинача ПАХ.

10. Апертура зустрічно-штирових перетворювачів вибирається у межах

$$W = (20 \dots 150) \lambda_p.$$

$$\text{Виберемо } W = 50 \cdot \lambda_p = 50 \cdot 69,8 = 3490 \text{ мкм} \approx 3,5 \text{ мм}$$

11. Ширина шини зустрічно-штирових перетворювачів вибирається у межах

$$d_{ш} = \frac{M - S}{2} = (10 \dots 50) \lambda_p.$$

$$\text{Виберемо } d_{ш} = 20 \cdot \lambda_p = 20 \cdot 69,8 = 1396 \text{ мкм} \approx 1,4 \text{ мм}$$

12. Зазор між шинами перетворювачів та електродами вибирається у межах

$$d_y = \frac{S - W}{2} = (3 \dots 5) \lambda_p.$$

$$\text{Виберемо } d_y = 3 \cdot \lambda_p = 3 \cdot 69,8 \approx 200 \text{ мкм} = 0,2 \text{ мм}.$$

13. Ширина підкладки:

$$L_{ш} = W + 2 \cdot d_y + 2 \cdot d_{ш} + 2d_n = 3500 + 2 \cdot 200 + 2 \cdot 1400 + 2 \cdot 1650 = 10000 \text{ мкм} = 10,0 \text{ мм},$$

де  $d_n = 1650 \text{ мкм}$  - відстань від шини ЗШП до краю підкладки.

Таким чином для виготовлення цієї ЛЗ на ПАХ необхідна підкладка із ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$  YZ-зрізу з розмірами: довжина – 20 мм; ширина – 10 мм; товщина 1,0 мм.

Результати розрахунків конструктивних параметрів ЛЗ на ПАХ за вищевказаною методикою подані в таблиці № 2.2.

Таблиця № 2.2.

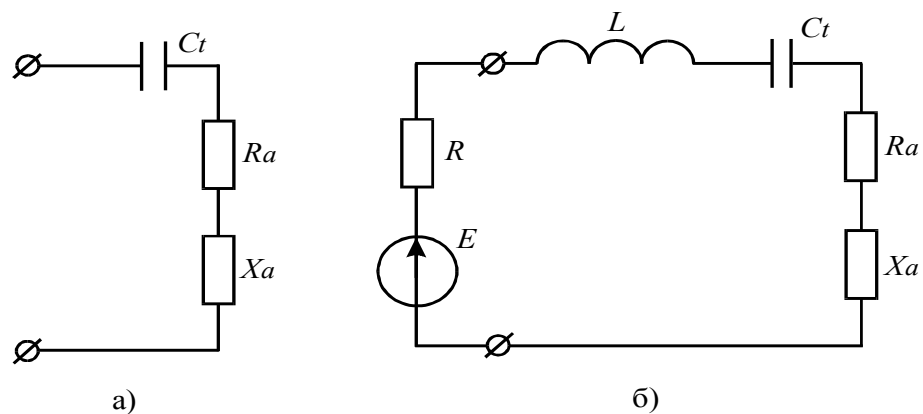
## Розрахункові параметри ЛЗ на ПАХ

№ п/п	Найменування параметрів	Позначення, одиниця виміру	Значення параметру
1	Матеріал звукопроводу	Ніобат літію $\text{LiNbO}_3$ , пластина -YZ- зріз, мм	$10 \times 20 \times 1$
2	Фазова швидкість ПАХ	$V$ , м/с	3488
3	Центральна частота	$f_0$ , МГц	50
4	Затримка сигналу	$\tau_p$ , мкс	1,8
5	Смуга пропускання лінії затримки на рівні – 3дБ	$\Delta f$ , МГц	4,0
6	Період ЗШП	$\lambda_p = \lambda_0$ , мкм	69,8
7	Число електродів вхідного та вихідного перетворювачів	$n_1 = n_2$	8
8	Довжина вхідного та вихідного перетворювачів	$l_{\text{вх}} = l_{\text{вих}}$ , мкм	261,75
9	Відстань між центрами перетворювачів	$L$ , мм	6278,4
10	Довжина поглинача ПАХ	$l_{\text{п}}$ , мм	2,73
11	Відстань між поглиначом та зустрічно-штировим перетворювачем	$l_0$ , мм	4,0
12	Довжина підкладки звукопроводу	$L_{\text{п}}$ , мм	20
13	Апертура зустрічно-штирових перетворювачів	$W$ , мм	3,5

1 4	Ширина шини ЗШП	$d_{ш}$ , мм	1,4
1 5	Зазор між шинами і електродами ЗШП	$d_y$ , мм	0,2

### 2.3. Методика розрахунку акустoeлектричних параметрів зустрічно-штирових перетворювачів

Характеристики зустрічно-штирових перетворювачів сильно впливають на параметри ПАХ-пристроїв, в особливості на ширину смуги пропускання, вносимі втрати та рівень паразитного сигналу.



**Рис. 2.4. Послідовна еквівалентна схема ЗШП (а) та схема компенсації реактивного опору перетворювача (б).**

Для зменшення вносимих втрат в ПАХ-пристроях ЗШП підключаються до узгоджуючих елементів. В цьому випадку величина втрат та ширина смуги пропускання пов'язані між собою і ця залежність визначається коефіцієнтом електромеханічного зв'язку. На Рис.2.4 зображена послідовна еквівалентна схема ЗШП (а) та схема компенсації реактивного опору перетворювача (б).

Послідовна електрична схема ЗШП містить послідовне з'єднання статичної ємності  $C_t$ , активної та реактивної складових опору випромінювання  $R_a(f)$  і  $X_a(f)$ , які визначаються співвідношеннями [1...5]:

для  $n_1 = n_2 = n = 8$  :  $C_t = (n-1)C_0W = (8-1) \cdot 4,6 \cdot 10^{-10} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 11,3 \cdot 10^{-12} \Phi \approx 11,3$  пФ;

$$R_a(f) = R_a(f_0) \frac{\sin\left[(n-1)\frac{\pi}{2}\delta\right]}{(n-1)\frac{\pi}{2}\delta}; \quad X_a(f) = R_a(f_0) \frac{\sin\left[2(n-1)\frac{\pi}{2}\delta\right] - 2(n-1)\frac{\pi}{2}\delta}{2\left[(n-1)\frac{\pi}{2}\delta\right]^2},$$

де  $C_0$  – погонна ємність пари електродів ЗШП (для ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$  YZ-зрізу  $C_0 = 4,6 \cdot 10^{-10} \Phi/\text{м}$ );  $W$  – апертура ЗШП;  $R_a(f_0)$  – активна складова опору випромінювання при резонансі, яка визначається формулою:

для  $n_1 = n_2 = n = 8$ :

$$R_a(f_0) = \frac{1}{8K_c^2 f_0^2 (n-1)^2 C_0 W} = \frac{1}{8 \cdot 0,045 \cdot 50 \cdot 10^6 (8-1)^2 \cdot 4,6 \cdot 10^{-10} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}} \approx 704 \text{ Ом};$$

де  $K_c^2$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку (ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$  YZ-зрізу  $K_c^2 = 0,045$ ).

На рис. 2.5 та 2.6 зображені залежності активної та реактивної складових опору випромінювання зустрічно-штирового перетворювача від частоти.

Для узгодження перетворювачів із зовнішніми ланцюгами послідовно з ЗШП включається індуктивність  $L$  для компенсації статичної ємності перетворювача і яка визначається формулою:

- для  $n_1 = n_2 = n = 8$ :

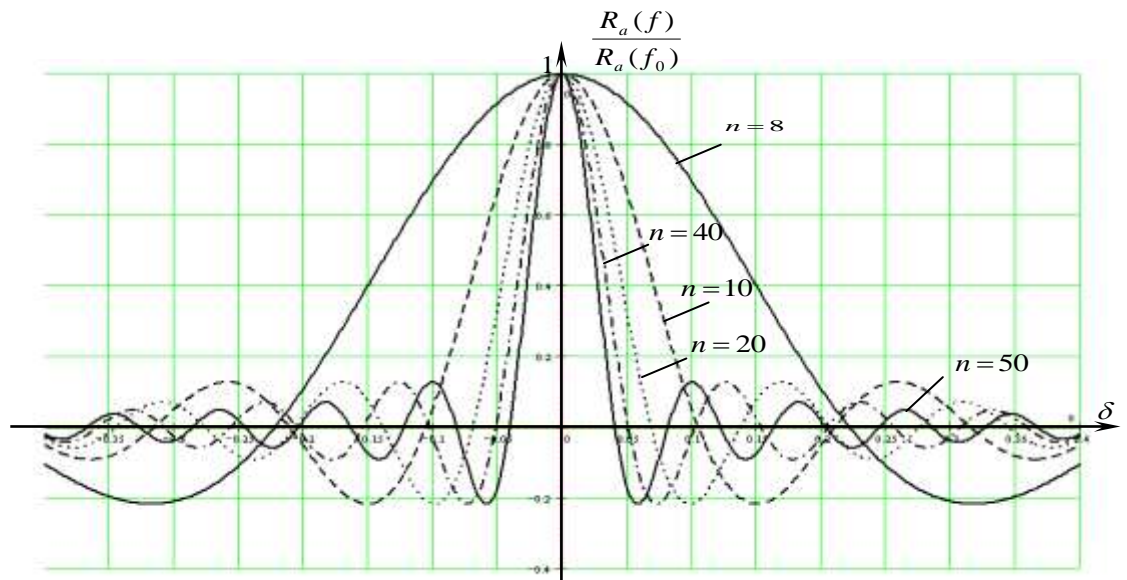
$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0 W (n-1)} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot (50 \cdot 10^6)^2 \cdot 4,6 \cdot 10^{-10} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} (8-1)} = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 0,9 \text{ мкГн}$$

При цьому індуктивність  $L$  разом із статичною ємністю перетворювача  $C_t$  створюють послідовний коливальний контур, електрична добротність якого залежить від числа пар електродів перетворювача  $(n-1)$  та коефіцієнта електромеханічного зв'язку  $K_c^2$ :

- для  $n_1 = n_2 = n = 8$ : 
$$Q_e = \frac{\pi}{4K_c^2(n-1)} = \frac{3,14}{4 \cdot 0,045 \cdot (8-1)} = 2,5.$$

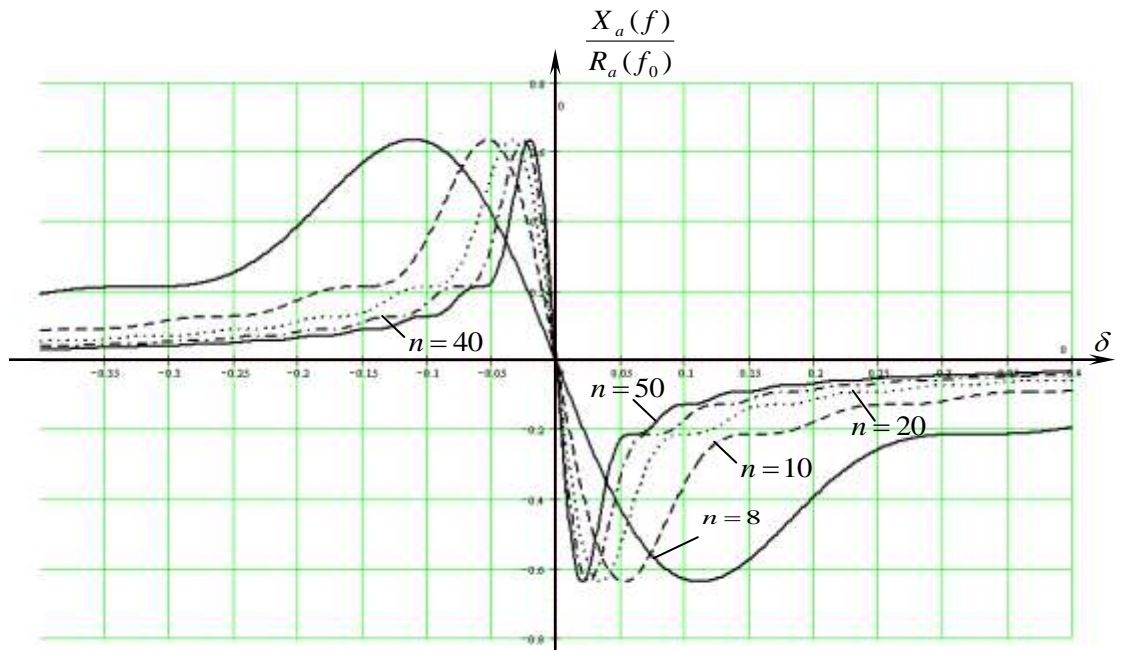
Акустична добротність перетворювача  $Q_a$  залежить лише від затримки сигналу в перетворювачі і від числа пар електродів перетворювача  $(n-1)$ ,

тобто: для  $n_1 = n_2 = n = 8$ : 
$$Q_a = \frac{f_0}{\Delta f} = (n-1) = 7.$$



**Рис. 2.5. Залежності активної складової опору випромінювання зустрічно-штирового перетворювача від частоти**





**Рис. 2.6. Залежності реактивної складової опору випромінювання зустрічно-штирового перетворювача від частоти**

Оптимальне узгодження перетворювача в робочій смузі частот є одним із головних умов, які забезпечують ефективну роботу перетворювачів та низький рівень відбиття в тракті. Однак другою, не менш важливою умовою є електричне узгодження із зовнішніми ланцюгами, тобто забезпечення рівності вхідного (вихідного) опору та опору джерела сигналу (або опору навантаження). Приймаючи опір зовнішніх ланцюгів постійним у смузі частот, під електричним узгодженням розуміють виконання співвідношення  $R_a(f_0) = R_{зовн.}$ , де  $R_{зовн.}$  - опір зовнішнього ланцюга.

Для забезпечення узгодження опору навантаження та опору випромінювання перетворювача необхідно виконання умови:

$$R_{зовн.} / R_a(f_0) = Q_e(N) / Q_a(N),$$

де  $Q_e(N)$  і  $Q_a(N)$  - електрична та акустична добротності перетворювача при вибраному значенні  $N = n - 1$ :

$$Q_e(N) = \frac{\pi}{4K_c^2 N} = \frac{\pi}{4K_c^2 (n-1)}; \quad Q_a(N) = N = (n-1).$$

Звідки 
$$\rho = \frac{R_{зовн.}}{R_a} = \frac{Q_e}{Q_a}.$$

Тоді для  $n_1 = n_2 = n = 8$ :  $\rho = \frac{Q_e}{Q_a} = \frac{2,5}{7,0} = 0,36$

Ступінь узгодження перетворювача  $\rho$  визначає енергетичні співвідношення в лінії затримки. При падінні ПАХ на перетворювач частина енергії відбивається від нього, частина перетворюється в електричний сигнал і виділяється в навантаженні, а частина проходить далі по звукопроводі і поглинається в поглинаючі поверхневі акустичні хвилі.

Коефіцієнти відбиття ПАХ  $B_{11}$ , проходження  $B_{21}$  і поглинання  $B_{31}$  визначаються наступними співвідношеннями:

- для  $n_1 = n_2 = n = 8$ :  $B_{11} = -10 \lg \frac{1}{(1+\rho)^2} = -10 \lg \frac{1}{(1+0,36)^2} = -2,7 \text{ дБ};$

$$B_{21} = -10 \lg \frac{\rho^2}{(1+\rho)^2} = -10 \lg \frac{0,36^2}{(1+0,36)^2} = -11,5 \text{ дБ};$$

$$B_{31} = -10 \lg \frac{2\rho}{(1+\rho)^2} = -10 \lg \frac{2 \cdot 0,36}{(1+0,36)^2} = -6,4 \text{ дБ}.$$

Відбиття акустичної хвилі спричиняє до появи помилкового сигналу, рівень якого визначається наступним рівнянням:

$$B_{\text{ПС}} = B_{11}^{\text{вх}} + B_{11}^{\text{вих}} = 2,7 + 2,7 = 5,4 \text{ дБ},$$

де  $B_{11}^{\text{вх}}$  та  $B_{11}^{\text{вих}}$  - коефіцієнти відбиття від вхідного та вихідного перетворювачів.

Таким чином, визначивши ступінь узгодження перетворювачів, можна розрахувати вносимі втрати ПАХ-пристрою. При цьому необхідно враховувати також теплові втрати на омичних опорах електродів ЗШП, затухання акустичного сигналу в процесі розповсюдження, дифракційне розширення акустичного променя, можливість генерації об'ємних акустичних хвиль. Загальні вносимі втрати можна оцінити наступним чином:

$$B = B_{31}^{\text{вх}} + B_{31}^{\text{вих}} = 6,4 + 6,4 = 12,8 \text{ дБ}.$$

Результати розрахунків приведено в таблиці № 2.3.

**Таблиця №2.3**

**Акустоелектричні параметри лінії затримки на ПАХ**

№	Найменування параметра	Значение параметра	
		Вхідний	Вихідний ЗШП

		ЗШП	
1	Число електродів $n$	8	8
2	Статична ємність $C_t$ , пФ	11,3	11,3
3	Активна складова опору випромінювання на центральній частоті, $R_a$ , Ом	704	704
4	Узгоджуюча індуктивність $L$ , мкГн	0,9	0,9
5	Електрична добротність $Q_e$	2,5	2,5
6	Акустична добротність $Q_a$	7	7
7	Ступінь узгодження $\rho$	0,36	0,36
8	Опір зовнішнього ланцюга $R_{\text{зовн}}$ , Ом	253	253
9	Коефіцієнт відбиття $B_{11}$ , дБ	2,7	2,7
10	Коефіцієнт проходження $B_{21}$ , дБ	11,5	11,5
11	Коефіцієнт поглинання $B_{31}$ , дБ	6,4	6,4
12	Рівень помилкового сигналу $B_{\text{ПС}}$ , дБ	5,5	
13	Загальні втрати на центральній частоті $B$ , дБ	12,8	

## В И С Н О В К И

1. Досліджена математична модель лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях на основі фізичної моделі дискретних джерел сигналів, яка дозволила розрахувати амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики ЛЗ на ПАХ. В результаті теоретичних досліджень показана залежність амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик від числа, конструкції та взаємного положення електродів зустрічно-штирових перетворювачів.

2. На основі методики інженерного розрахунку визначено конструктивні та акустoeлектричні параметри лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях (Таблиці №№ 2.2 та 2.3) з наступними параметрами: час

затримки - 1,8 мкс; центральна частота – 50,0 МГц; смуга пропускання на рівні – 3,0 дБ - 4,0 МГц; привнесені втрати на центральній частоті 12,8 дБ.

### **3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ**

Технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ можна представити у вигляді трьох етапів: виготовлення підкладки з п'єзоелектрика, формування електродних структур на її поверхні, складання та дослідження параметрів пристрою [1, 4, 8, 16, 18, 19]. Виготовлення підкладки включає наступні основні операції: орієнтація кристала, різання, шліфування, полірування і відмивання. Для формування електродних структур виконуються операції відмивання, нанесення тонкої плівки металу і фотолітографії. Складання включає нанесення акустичного поглинача, приклеюку пластини до корпусу, монтаж електричних виводів і герметизацію. Усі приведені вище технологічні операції виготовлення пристроїв на ПАХ використовуються в технології виготовлення інтегральних мікросхем. Однак, застосування п'єзоелектричних монокристалів, а також специфіка пристроїв на ПАХ поставили ряд вимог до відомих технологічних процесів. Так, пристрої на ПАХ вимагають більш точної орієнтації підкладки, високої здатності, при виготовленні елементів на великих площах. Для найбільш освоєного діапазону частот від 10 до 400 МГц ширина електродів коливається від 1,5 до 50 мкм для одиночних штирів, і від 1 до 25 мкм для розщеплених, а загальна кількість їх змінюється від 10...100 до 400...600. При цьому довжина штиря повинна бути не менш  $(40...200) \lambda$ , тобто відношення довжини до ширини може наближатися до 200. Цей факт викликає значні складності в технології виготовлення ПАХ-структур, тому що при великій довжині і малій ширині штирів збільшується імовірність розривів і відходу лінійних розмірів від заданих на кожному етапі літографічного процесу. Разом з тим існують значні спрощення в технології виготовлення деяких різновидностей акустoeлектронних виробів у порівнянні з технологією виготовлення інтегральних схем, наприклад, топологія пристроїв на ПАХ одношарова і тому виключаються складні процеси сполучення шарів, відсутні процеси дифузії і т.д.

#### **3.1. Виготовлення звукопроводу**

Для пристроїв на ПАХ застосовуються п'єзоелектричні підкладки у формі паралелепіпеда. Основним параметром ЛЗ на ПАХ є швидкість розповсюдження хвилі, вона залежить у першу чергу від характеристик матеріалу звукопроводу п'єзоелектрика, у якому відбувається збудження, поширення і детектування ПАХ. Тому особливе місце у виготовленні ЛЗ займає виготовлення й обробка підкладки.

П'єзоелектричні монокристали [17] вирощують методом Чохральського у вигляді циліндричних буль, діаметр яких може досягати 50...70 мм, а довжина 100...200 мм. П'єзоелектричний монокристал ніобату літію вирощують в автоклавах високого тиску гідротермальним способом. Кристалографічні напрямки в булях визначаються орієнтацією затравок, з яких вирощують кристал. Першою стадією виготовлення підкладки є орієнтація булів рентгенівськими методами і розпиляння на заготовки на верстатах з алмазними дисками. Після розпиляння пластин над ними проводять перше шліфування для створення базової поверхні необхідної орієнтації з точністю  $\pm 10'$ , що прийнятно для більшості пристроїв на ПАХ, потім обробляється контур і зворотна сторона підкладки.

Зустрічно-штирвові перетворювачі (ЗШП), крім ПАХ, збуджують й об'ємні акустичні хвилі, які відбиваючись від нижньої і верхньої поверхні підкладки досягають вихідного ЗШП, вносячи при цьому спотворення. Для придушення цих хвиль зворотну сторону підкладки необхідно обробити так, щоб об'ємні хвилі не відбивалися, а розсіювалися в ній. Для цього на неї наносяться алмазним диском насічки під кутом до напрямку поширення ПАХ. Крок приблизно складає 5...15 довжин хвиль ПАХ, глибина дорівнює половині кроку. На високих частотах (понад 100 МГц) для ефективного розсіювання об'ємних хвиль досить прошліфувати зворотню сторону підкладки грубим шліфувальним порошком.

Перед поліруванням пластини піддають шліфуванню порошком М-20, при цьому знімається шар 0,25 мм, порошком М-10 - знімається шар 0,15 мм,

і ще раз порошком М-10 - знімається шар 0,1 мм. Полірування пластин здійснюється на плоско-шліфувальних верстатах. Для полірування ніобату літію використовується суспензія на основі синтетичних алмазних порошоків АСМ 3/2 і АСМ 1/0, якою знімається шар товщиною 5...10 мкм. Швидкість обертання шліфувальника і тиск на пластини підбирають експериментальним шляхом і звичайно вони складають відповідно 50...200об/хв, 0,5...2,0 Н/см<sup>2</sup>. Процес полірування пластин необхідно проводити в окремих технологічних приміщеннях, що мають низьку запиленість. Полірувальні суспензії повинні бути ретельно приготовлені і не містити часток, розмір яких перевищує розмір часток поліруючої речовини. Після полірування пластини не повинні мати подряпин і поверхня повинна відповідати вимогам ДСН 11141- 76, класу чистоти - Р1.

Описаний метод виготовлення підкладки дозволяє виготовляти пристрої на ПАХ на частотах аж до 400...500 МГц. Для більш високих частот необхідно додатково обробляти поверхню хіміко-механічними методами полірування.

Зустрічно-штирові структури ЛЗ на ПАВ виготовляються з тонкої плівки алюмінію, нанесеної на поверхню підкладки методом термовакuumного напилювання. Вибір алюмінію як матеріалу електродів обумовлений наступним:

- низьким питомим опором;
- невеликою питомою масою в порівнянні з іншими металами;
- освоєною технологією нанесення плівки;
- малою вартістю алюмінію і технологічністю процесу його нанесення;
- стійкістю алюмінію до впливу навколишнього середовища;

Тому що алюміній є відносно легкоплавким металом, то для напилювання плівки використовують метод термічного випару у вакуумі. Найпростіше це здійснюється з використанням прямоканальних резистивних випарників, виконаних з тугоплавких металів (вольфрам).

При термічному випарі адгезія плівки алюмінію до поверхні підкладки низька. Тому в якості адгезійного підшару використовується ванадій. Вибір ванадію обумовлений задовільними адгезійними властивостями, відносною легкістю випару і можливістю одночасного чи роздільного травлення з алюмінієм. При напилюванні ванадію потрібен високий вакуум і відносно велика швидкість напилювання, тому що завдяки хімічній активності при підвищених парціальних тисках кисню й азоту відбувається інтенсивне утворення окислів і нітридів. Оптимальні результати досягаються при швидкості напилювання не меншій 3 мм/с і робочому вакуумі не гірше  $1 \cdot 10^{-3}$  тор з обов'язковим застосуванням пасток, охолоджуваних рідким азотом, і натіканням повітря в систему не більш  $3 \cdot 10^{-3}$  п. тор/с. Зниження швидкості напилювання, збільшення тиску і швидкості натікання повітря різко позначається на фізичних і хімічних властивостях плівок ванадію: підвищення питомого опору, погіршення відтворюваності, утрудненні травлення і т.д. Для забезпечення задовільної адгезії плівки алюмінію товщина підшару ванадію повинна бути 5...50 нм. Оптимальна температура підкладки при напилюванні алюмінію складає  $120 \pm 10$  °C, швидкість осадження 10 нм/с. Товщина плівки Al коливається в межах 0,08...0,5 мкм, у залежності від робочої частоти пристрою на ПАХ.

Для одержання гарної адгезії і відтворюваності електрофізичних властивостей нанесених металевих плівок поверхня звукопроводу повинна бути добре очищена. Процедура очищення можна розділити на етапи попереднього й остаточного очищення. Процес очищення ніобату літію можна проводити за наступною схемою :

- знежирення в трихлоретилені ( $C_2HCl_3$ ), швидкість знежирення збільшується при температурі кипіння (10 хв);
- промивання в ацетоні або в етиловому спирті (10 хв);
- відмивання в кислотному або в лужному розчині (можна використовувати розчин двохромовоокислого калію, чи перекису водню з додаванням лугу), підкладки варто витримувати в киплячому розчині 15 хв;



- відмивання в проточній деіонізованій воді з механічною обробкою обертовими кистями 30... 40 хв (питомий опір води 10...18 МОм);
- сушіння пластин у центрифугах, що знаходяться в обеспиленних скафандрах.

Хімічне остаточне ультразвукове очищення проводиться в гарячій воді з розчиненим в ній миючим засобом, а потім тривале відмивання в гарячій воді. Після цього підкладки кип'ятять в ацетоні протягом 5 хв. Сушіння відбувається в парах ацетону на відстані 1,5...2 см над його поверхнею протягом  $45 \pm 15$  с.

Недостатньо якісне очищення підкладок звичайно призводить до поганої адгезії металевої плівки, а механічні забруднення - до проколів у плівці, що ведуть до обривів електродів ЗШП.

### **3.2. Формування електродних структур .**

Основною найскладнішою операцією при виготовленні пристроїв на ПАХ є формування електродних структур [1, 4, 8, 16, 18, 19]. Робочі параметри виготовлених пристроїв обмежуються такими характеристиками літографічного процесу як роздільна здатність, точність, щільність дефектів та ін. До відомих методів літографії відносяться контактна, проекційна фотолітографія, електроннопроменева і рентгенографія, лазерографія і голографія.

Порівняння показують, що голографія, електроннографія і рентгенографія хоча і забезпечують необхідну для більшості пристроїв на ПАХ роздільну здатність, але мають малі робочі поля, а також складніше і дорожче обладнання. Для масового виробництва технічно й економічно вигідне застосування контактної фотолітографії. Основні етапи процесу формування топології на підкладці методом контактної фотолітографії показані на рис.3.1.

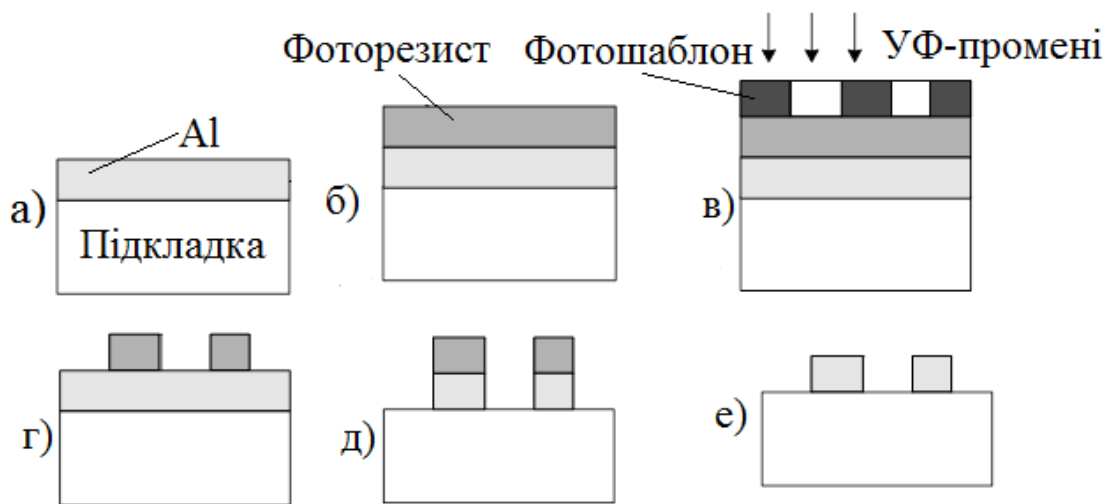


Рис. 3.1. Основні етапи фотолітографії: а – підкладка з металевою плівкою;  
 б – нанесення фоторезисту; в – експонування через фотошаблон; г – проявлення фоторезисту; д – травлення металевої плівки; е – зняття фоторезисту

В основу процесу фотолітографії покладена здатність деяких високомолекулярних з'єднань (фоторезистів) змінювати свої властивості під дією світла. У залежності від механізму фотохімічних процесів, що протікають під дією випромінювання, розрізняють позитивні і негативні фоторезисти.

У позитивних фоторезистах під дією світла відбувається руйнування міжмолекулярних зв'язків і опромінені ділянки стають розчинними в лужних розчинах. Негативні фоторезисти полімеризуються під дією світла і не розчиняються в проявнику. Негативні фоторезисти мають меншу роздільну здатність через велику довжину молекул і не забезпечують необхідної якості фотолітографії. На рис.3.1 зображено приклад експонування через фотошаблон позитивного фоторезисту. Експонування виробляється через щільно притиснутий до поверхні пластини фотошаблон (контактна фотолітографія). Метод простий і зручний, дозволяє автоматизувати процес фотолітографії, здійснювати групову обробку пластин на всіх стадіях виготовлення структур на ПАХ.

Теоретична межа роздільної здатності контактної фотолітографії дорівнює довжині хвилі активного випромінювання. При використанні стандартних джерел УФ-випромінювання роздільна здатність складає приблизно 0,4 мкм. Головним фактором, що обмежує роздільну здатність є дифракція світла на елементах топології. Виникнення дифракційних ефектів зв'язано з наявністю зазору між фотошаблоном і пластиною. Навіть в умовах твердого притиску шаблону до пластини контактуючі поверхні не прилягають одна до одної по всій площині через шорховатості як фотошаблону так і пластини. Крім того, кожна часточка, що потрапила на контактуючі поверхні приводить до утворення зазору.

Контактна фотолітографія може забезпечити і більш вузькі лінії, шириною порядку 1 мкм, але для цього необхідно усунути дифракційні ефекти (ліквідуючи зазор), застосовуючи фотошаблони і підкладки, неплщинність яких значно менше оптичної довжини хвилі, наносячи рівномірні плівки фоторезисту, усунувши пил і мікронерівності, а також підібравши оптимальні технологічні режими нанесення, експонування, проявлення, травлення і т.д., особливо при великих робочих полях.

Одним з показників, що характеризує якість розробки технологічних процесів, є величина розкиду параметрів готової продукції. Вона залежить від ступеню нестабільності процесу виробництва і від чутливості електричних параметрів виробів до нестабільності виробництва.

Проблема реалізації характеристик пристроїв на ПАХ пов'язане з надійністю фотолітографічних методів, що забезпечують високу роздільну здатність, мінімальний відхід і розкид параметрів, точність сполучення, відтворюваність структур. Одна з основних проблем технології літографічного процесу - дотримання жорстких допусків на розміри елементів зображення, що звичайно не перевищують 5 % номінального значення ширини лінії. Для більшості пристроїв практично не допускаються (1%) обриви електродів, найбільш небезпечні в області центрального пелюстка зустрічно-штирьової структури. Не допускаються замикання

електродів у зоні їхнього взаємного перекриття, поза зоною можлива наявність не більш 3-5 дефектів типу “острівець”. Не допускаються наскрізні подряпини чи пори на електродах контактних площадках, що оголюють підкладку в будь-якій точці, а також наскрізні подряпини чи пори, що зменшують перетин електродів контактних площадок більш ніж на 40 %. Не допускається наявність сторонніх часток, що з'єднують будь-які два плівкових елементи структури і, що не видаляються за допомогою очищення газом, а також наявність між електродами металевих ділянок, що мають діаметр більш 50 % зазору між електродами.

Оптимізація технологічного процесу фотолітографії спрямована на підвищення якості проведення операцій і забезпечення надійності за допомогою підвищення вимог при контролі. З метою оптимізації процесу фотолітографії були відпрацьовані режими і маршрути операцій : нанесення фоторезисту, сполучення й експонування, проявлення, травлення. Метою даної роботи було з'ясування дії різних факторів, що впливають на протікання цих операцій, визначення найбільш істотних з них, вибір умов, при яких якість обробки відповідає пред'явленим вимогам. Відпрацьовування режимів технологічного процесу виготовлення ЛЗ можуть вироблятися на установках, що входять в автоматизований комплекс “Лада-125”: автомат нанесення фоторезисту 08ФН-125/200-004, установка ІК-конвеєрної термообробки 02СТ-170-005, автомат проявлення фоторезисту 08ФН-125/200-003. Операції травлення і зняття фоторезисту виконуються на устаткуванні, що входить у напіваавтоматичну лінію “Лада-1” : установка обробки в органічних розчинниках 084ХО-100-003, установка відмивання і сушіння 0848ЛС-0/1500-004 . Для міжопераційного контролю використовується мікроскоп МССО ТУ 3-3587.78, а для більш точного контролю відтворюванності розмірів - мікроскоп МЕТАМ ДСТ 15150-69, який дає максимальне збільшення в 300 разів.

Технологічний процес фотолітографії проводиться в приміщенні, що відповідає вимогам електронно-вакуумної гігієни ОТТ 4ГО.091 319-81, третьому класу по чистоті, другому класу по вологості і температурі.

Нанесення фоторезисту є одною з основних і найбільш відповідальних операцій фотолітографічного процесу, тому що від якості плівки фоторезисту в основному залежить якість зображення структури (чіткість краю, відсутність невитравлених ділянок, щільність проколів), недотримання оптимального режиму може привести до неточної передачі розмірів. Фоторезисти повинні забезпечувати одержання тонких ( $0,2\div 3$  мкм) і суцільних плівок з якісною адгезією до підкладки, високою рівномірністю по товщині ( $1\div 5$  %), відсутністю механічних і інших забруднень.

З метою зниження дефектності плівки фоторезист перед нанесенням доцільно піддати центрофугування протягом однієї години з частотою обертання 6000...7000 об/хв. Після цього проводиться ретельна фільтрація під тиском через фільтри тонкого очищення з розміром пір 0,25 мкм (Millipor) . Фільтри встановлюються безпосередньо в установку нанесення фоторезисту.

Фоторезист наносять методом центрофугування на установці 08ФН-125/200-004. Підкладка закріплюється на металевому столику за допомогою вакууму. При включенні центрифуги з дозатора на центр пластини подається кілька капель фоторезисту. Під дією центробіжної сили фоторезист розтікається по поверхні пластини, а надлишки скидаються в збірник. З моменту попадання фоторезисту на пластину починається інтенсивний випар розчинника, у результаті чого в'язкість фоторезисту швидко зростає. У визначений момент часу внутрішні сили зчеплення молекул фоторезисту врівноважують відцентрові сили, розтікання фоторезисту припиняється і формування шару закінчується.

Товщина шару визначається швидкістю обертання центрифуги, часом центрування і в'язкістю фоторезисту. Фактори, що спотворюють малюнок, сильніше виявляються в товстому фотошарі, тому зі збільшенням товщини роздільна здатність падає. З іншого боку, товщина шару повинна бути достатньою, щоб протистояти дії травників і перекривати неминучі локальні

дефекти в структурі плівки. Таким чином, вибір товщини фотошару обумовлений компромісом між вимогою достатньої роздільної здатності і адгезії, та з іншого боку захисними властивостями фотомаски. При цьому можна виходити з того, що мінімальний розмір елемента  $a_{min}$  і товщина шару фоторезисту  $h$  у визначеному наближенні зв'язані співвідношенням  $h \leq 0.3 \cdot a_{min}$ . Це співвідношення накладає обмеження на максимально припустиму товщину фотошару. Максимально припустима величина визначається припустимою щільністю проколів, оскільки зі зменшенням  $h$  щільність проколів зростає.

Для одержання мінімального розміру елемента  $a_{min} = 1,7$  мкм товщина шару  $h \leq 0,3 \cdot 1,7 \approx 0,5$  мкм. Основні характеристики фоторезистів ФП-383 і ФП-051МК приведені в табл.3.1.

**Таблиця 3.1**

**Основні характеристики фоторезистів ФП-383 і ФП-051 МК**

Фоторезист Т	В'язкість, мм <sup>2</sup> /с	Щільність, ρ г/см <sup>3</sup>	Мінімально відтворений розмір, мкм	Товщина плівки, мкм
<b>ФП - 383</b>	<b>6...6,5</b>	<b>0,923</b>	<b>2,4</b>	<b>1,6±0,2</b>
<b>ФП- 051МК</b>	<b>40±5</b>	<b>1,057</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0±0,2</b>

Експериментально перевірялися залежності товщини шару фоторезисту від в'язкості і числа обертів центрифуги. Режими нанесення змінюються в наступних межах: доза 0,5...12, розтікання  $\tau=1...10$  с ( $v_1=600...1500$  об/хв), формування  $\tau=20...40$  с ( $v_2=3000...6000$  об/хв), тиск у бачку з фоторезистом  $P=0,6...0,7$  кг·с/см<sup>2</sup>.

При роботі з ФП-383 спостерігалася поява при центрифугуванні нерівномірностей, що мають вид променів, що радіально розходяться від центру пластини. Поява променів призводить до локальної зміни розмірів (нерівність краю), тому що умови експонування променів на виступі і

впадині різні. Крім того по краю підкладки виникає стовщення, ширина і висота якого залежить від в'язкості фоторезисту, швидкості і часу обертання центрифуги.

Дослідження показали, що зі збільшенням частоти обертання центрифуги покриття виходять більш тонкими, і що більш важливо, рівномірними. Час прискорення також є важливим чинником. Мінімальний розмір стовщення був отриманий при мінімальному часі прискорення (1с). Час центрифугування мало впливає на параметри шару, для формування досить 20...30 сек. При центрифугуванні зі швидкістю вище 6000 об/хв зростає щільність проколів в плівці фоторезисту.

Для ФП-383 експериментальним шляхом були отримані наступні оптимальні режими нанесення: доза 0,5...0,7, розтікання  $\tau=1\text{с}$  ( $v_1=1500$  об/хв), формування  $\tau=20\text{...}30\text{с}$  ( $v_2=5000$  об/хв). Товщина отриманого шару вимірюється з використанням мікроскопу МІІІ-4.

Кращі результати були отримані при роботі з фоторезистом ФП-051МК. Він характеризується більшою роздільною здатністю, більшою стійкістю до хімічних впливів, кращою адгезією до плівки алюмінію. Для досягнення товщини  $h=0,5\text{мкм}$  збільшення швидкості обертання центрифуги виявилось недостатнім. Тому був створений розчинник (диоксан) для розведення фоторезисту у визначеному, емпірично підбраному співвідношенні (1:2). У такий спосіб виявлено, що найбільш висока якість фотошару по товщині і рівномірності забезпечує фоторезист ФП-051МК розведений диоксаном у співвідношенні 1:2. Для одержання заданої (номінальної) товщини шару доцільно частоту обертання установлювати вище критичної (5000 об/хв), тобто в області, де вона практично не впливає на товщину для задовільної відтворюваності результатів.

Наступною операцією при нанесенні фоторезисту є сушіння, ціль якої полягає у видаленні залишків розчинника, що може послабити адгезію фоторезисту до металевої плівки. Щоб уникнути зниження світлочутливості, розтріскування плівки фоторезисту і збереження її еластичності сушіння

доцільно проводити в два етапи: попереднє витримання при кімнатній температурі протягом 10-15 хв, і остаточне сушіння при температурі 90-100 °С. Операція проводиться на установці ІЧ-конвеєрної термообробки,

температура в якій підтримується за законами відповідно 95-100-95 °С протягом 6-8 хв. При ІЧ- сушінню джерелом теплоти є підкладка, що поглинає ІЧ - випромінювання, тоді як навколишнє середовище (повітря) зберігає приблизно кімнатну температуру завдяки безупинному продуванню. При цьому в плівці фоторезисту відбуваються складні релаксаційні процеси, що ущільнюють структуру шару, що зменшують внутрішні напруження і підвищують адгезію шару до підкладки. Особливо небезпечним є перепади температури вздовж заготовки.

При недостатньому сушінні можуть змінюватися вимоги до експонування, тому що розчинник перешкоджає утворенню поперечних зв'язків і перетворенню функціональних груп, в результаті чого буде спостерігатися розмивання структури. Відхилення температури сушіння від оптимального значення на кілька градусів призводить до відхилення розмірів елементів (спостерігається недопроявлення малюнка при пересушуванні або перепроявлення і відхід розмірів при недостатній температурі сушіння фоторезисту). Час експонування недосушеного фоторезисту збільшується внаслідок того, що при засвічуванні молекули розчинника, що залишився, екранують шар, який лежить нижче, і після прояву залишаються дефекти у виді нерозчинених областей.

Підкладки з нанесеним фоторезистом експонують на установках сполучення й експонування ЕМ-576А (довжина хвилі випромінювання ртутної лампи  $\lambda=350\ldots450$  нм), ЕМ 5006 А ( $\lambda=350\ldots450$  нм ). Установки містять пристрій сполучення, за допомогою якого здійснюється взаємна орієнтація підкладки і фотошаблону, і забезпечується щільний контакт між ними (вакуумний притиск). Щораз перед початком роботи варто перевіряти освітленість  $L=40$  тис. лк.



Технологічні режими експонування вибираються у відповідності з властивостями використовуваного фоторезисту. При виборі оптимального часу експонування варто враховувати взаємозв'язок його з часом прояву. З метою зменшення спотворень через дифракцію і відбивання, які ведуть до розширення експонованих ділянок, у результаті чого після прояву спостерігається відхід від розмірів, варто зменшувати час експонування.

З іншої сторони недостатньо експонований малюнок цілком залишається під “вуаллю” нерозчинного полімеру.

Як проявник добре зарекомендував себе 0,5% розчин лугу КОН при  $T=22^{\circ}$ ,  $pH$  розчину  $=12,84 \pm 0,01$ .

Основними параметрами оцінки якості прояву є точність передачі (відношення розмірів зображення на фоторезисті до розмірів на фотошаблоні) і відтворюваність. Дослідження показали, що фоторезист ФП-383 відрізняється нестабільністю при одержанні мікронних штрихів порядку 3 мкм і менше, але дає задовільні результати при виготовленні структур з мінімальними розмірами більше 10 мкм. При цьому оптимальний час експонування на установці ЕМ-756А  $t_3=6...8$  сек, при цьому час прояву  $t_{пр}=15...20$  сек.

Для одержання елементів з розмірами порядку 1,7...3 мкм доцільно використовувати фоторезист ФП-051МК, тому що в нього краща адгезія до підкладки і він більш стійкий до впливу проявника. Необхідна якість малюнка виходить шляхом зменшення часу експонування при збільшенні часу прояву. При цьому оптимальні режими експонування на установці ЕМ-5006А  $t_3=2...3$  сек,  $t_{пр}=40...60$  сек.

Після прояву варто провести контроль якості отриманого зображення.

Можливі наступні види дефектів на виявленому малюнку в шарі фоторезисту й основні причини їхнього виникнення:

- неповний прояв: перевищення  $t$  сушіння фоторезисту; недостатній час експонування; величина  $pH$  проявника менша встановленої; товщина фоторезисту більше заданої; малий час прояву;

- нерівність краю малюнка: брудний фотошаблон; наявність зазору між пластиною і фотошаблоном у момент експонування; недостатня обробка фото шару;

- збільшені розміри ділянок, вільних від фоторезисту: збільшений час експонування; наявність зазору між пластиною і фотошаблоном у момент експонування; перевищення  $pH$  розчину для прояву; перевищення температури проявника;

- наявність механічних ушкоджень проявленої плівки фоторезисту: часточки фоторезисту, що прилипли до шаблону при повторному експонуванні без промивання фотошаблону; сполучення при нульовому контакті; неакуратність роботи оператора;

- локальні проколи і включення в шарі: неякісний фотошаблон; неякісна фільтрація фоторезисту; пилинки між фотошаблоном і пластиною; повітряні міхури, що утворюються при зануренні пластини в розчин проявника;

- у процесі прояву вилучений весь фоторезист: перевищення часу межопераційного збереження пластин; незадовільна якість металевої плівки; низька температура чи недостатній час термообробки фоторезисту; перевищення часу витримки в проявнику; перевищення величини  $pH$  і  $t$  розчину для прояву;

- нечітке зображення або нерівномірний відхід розмірів по робочому полю: поганий контакт фотошаблону з підкладкою; неплоскостність пластини або фотошаблону вище норми.

Аналіз причин виникнення дефектів показує тісний взаємозв'язок і вплив кожної попередньої операції на наступну, у результаті чого причиною прояву браку при формуванні малюнка у виявленому шарі фоторезисту може виявитися відхилення від оптимальних режимів кожної з попередніх операцій.

Наступна термообробка виявленого рельєфу проводиться з метою підвищення адгезії і хімічної стабільності фоторезистивного покриття. Від температури і характеру підвищення її під час сушіння залежить точність

передачі розмірів зображень. Різке нагрівання викликає оплавлення країв, тому для точної передачі малих розмірів застосовується плавне підвищення температури. Недосушіння резисту призводить до швидкого підтравлювання, навіть при низьких температурах травлення. Збільшення температури може привести до глибокої полімеризації фоторезисту, після якої навіть при тривалому впливі органічних розчинників не вдається видалити залишки фоторезисту. Оптимальні режими сушіння на установці конвеєрної термообробки 6...8 хв при  $T=120-125-120$  °C відповідно для трьох зон.

Травлення є завершальною стадією технологічного процесу формування електродних структур і впливає на вихідні параметри виробів. До процесу травлення висувають наступні вимоги: мінімальні спотворення геометричних розмірів структур; повне видалення матеріалу на ділянках, не захищених фоторезистом; висока селективність травника; можливість керування процесом.

Якість травника багато в чому визначається якістю фоторезистивної маски, її адгезією до підкладки, мікроструктурою і рівномірністю по товщині. Травники повинні бути хімічно пасивними стосовно матеріалу фотомаски. Повинні допускати можливість підбору оптимальної для даних умов швидкості травлення, що забезпечує з однієї сторони мінімальну щільність дефектів отриманого малюнка, а з іншої - можливість точного контролю часу травлення. Для травлення плівок алюмінію широко використовується травник наступного складу: кислота ортофосфорна 76 мл, кислота оцтова 15 мл, кислота азотна 5 мл, вода 5 мл.

Оптимальним режимом процесу травлення є: температура травника  $T=45^{\circ}\text{C}$ , час травлення - 60 сек. При зміні температури травника більше, ніж на  $5^{\circ}\text{C}$  змінюється час травлення, а занадто повільне чи швидке травлення призводить до збільшення величини підтравлювання.

Особливістю даного травника є те, що в процесі травлення утворюються пухирці водню, що тяжко видаляються унаслідок великої в'язкості травника (ортофосфornoї кислоти). Видаляти їх необхідно для того,

щоб не залишалися непротравлені ділянки (характерні великі плями алюмінію), що призводять до закорочування електродів. Тому для досягнення кращих результатів травлення ефективно використовується травник наступного складу: окис хрому - 60 г, фтористий алюміній - 10 г, вода - 1 л. Перевагою його є відсутність недотравлених ділянок, кімнатна температура травлення при тому ж часі травлення, одержання більш чіткого краю малюнка. Для одержання мінімального підтравлювання, що більше позначається на елементах з розмірами менше 3 мкм, застосовується періодичне видалення продуктів реакції швидким промиванням струменем води. Для підбурення підшару ванадію використовується 30% розчин перекису водню,  $T=22^{\circ}\text{C}$  і  $t=4-7$  сек.

Найпростішою й остаточною операцією процесу фотолітографії є видалення фоторезисту. За умови дотримання оптимальних режимів технологічного процесу видалення фоторезисту легко здійснити в холодній суміші диметилформениду і моноетиноламіну (1:1).

У такий спосіб для одержання високої точності передачі, відтворюваності і якості електродних структур необхідне дотримання оптимальних режимів всіх операцій. Крім того для одержання високої якості малюнка необхідне використання фоторезисту ФП-051МК. ФП-383 дає гарну відтворюваність результатів при виготовленні структур з розмірами елементів порядку 10 мкм і більше.

### **3.3. Конструктивні особливості пристроїв на поверхневих акустичних хвилях**

Для захисту від зовнішніх впливів акустoeлектронні модулі на ПАХ розміщуються в корпусах, до яких пред'являються наступні вимоги:

- корпус повинен бути виготовлений металів з високою електропровідністю (мідь, латунь, алюміній) для електромагнітної розв'язки між входом і виходом пристрою;

-виводи повинні бути високочастотними і герметичними, повинні бути розташовані поблизу контактних площадок пристрою на ПАХ;

-корпус повинен забезпечити герметичність- усередині корпусу створюється вакуум або запускається інертний газ.

Операції складання пристроїв на ПАХ проводяться за наступною схемою: приклейка підкладки в корпус; розварювання золотим дротом електричних виводів і заземлень; зміцнення лаком чи струмопровідним клеєм золотих виводів на контактних площадках; герметизація корпусу; перевірка герметичності гелієвим пристроєм для пошуку витікання через штенгель; відкачка і наповнення інертним газом; герметизація штенгелю.

Приклеювання пластини повинно забезпечити механічну міцність при вібрації та ударах. Шар клею повинен бути досить еластичним, щоб при температурних розширеннях корпусів не розривалася пластина. Клей не повинен виділяти газоподібні речовини, взаємодіючи з підкладкою і металевою плівкою ЗШП на її поверхні. Найбільш придатним є кремнійорганічний компаунд КЛТ-30.

Приєднуються провідники до контактних площадок мікрозварюванням. Труднощі створення подібного роду зварених з'єднань полягають у наступному:

-мала товщина металевих плівок, нанесених на тендітні підкладки;

-велика різниця в товщинах елементів, що з'єднуються, (золоті провідники діаметром 40 мкм і плівки товщиною 0,2...0,5 мкм);

-велике розходження у фізичних властивостях матеріалів, що зварюються.

Основними причинами виходу з ладу в процесі експлуатації пристроїв на ПАХ є:

- руйнування п'єзоелектричної підкладки;
- порушення цілісності елементів кріплення (найчастіше зварених з'єднань) чи виникнення в них залишкових деформацій;
- виникнення механічних ушкоджень і структурних змін у поверхневому шарі звукопроводу.

## В И С Н О В К И

Приведена схема технологічного процесу виготовлення лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях, яки складається з таких технологічних процесів:

1. Механічна та хімічна обробка звукопроводу є дуже важливою частиною технологічного процесу виготовлення функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях, бо недостатньо якісне очищення підкладок звичайно призводить до поганої адгезії металевій плівки, а механічні забруднення – до проколів у плівці, що ведуть до обривів електродів зустрічно-штирових перетворювачів.

2. Формування електродних структур є основною і найскладнішою операцією при виготовленні функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях,. Проблема реалізації характеристик пристроїв на ПАХ пов'язана з надійністю фотолітографічних методів, що забезпечують високу роздільну здатність, мінімальний розкид параметрів, точність сполучення, відтворюваність структур. Приведена порівняльна характеристика фоторезистів ФП-051МК та ФП-383, кращі результати були отримані при роботі з фоторезистом ФП-051МК. Виявлено залежність часу експонування і точності передачі розмірів елементів від температури сушіння. Як проявник, добре зарекомендував себе 0,5% розчин лугу КОН при  $T=22^{\circ}$ , рН розчині  $=12,84 \pm 0,01$ . Виявлено залежність часу прояву від часу експонування.

3. Аналіз причин виникнення дефектів показав тісний взаємозв'язок і вплив кожної попередньої операції на наступну, у результаті чого причиною браку при формуванні структури у виявленому шарі фоторезисту може виявитися відхилення від оптимальних режимів кожної з попередніх операцій.

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 4.1. Методика експериментальних досліджень ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях

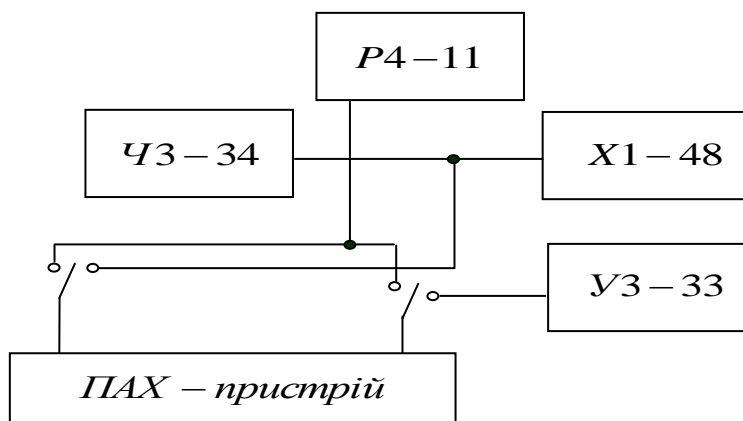
У таблиці 4.1 представлені основні параметри вимірювальної апаратури, що використовується в процесі вимірювання параметрів ЛЗ на ПАХ. З'єднання приладів і ЛЗ на ПАХ здійснюється за допомогою коаксіальних кабелів та коаксіальних переходів, що входять у комплект вимірювальних приладів.

Таблиця 4.1

#### Параметри вимірювальної апаратури

№ п/п	Найменування	Тип	Технічні умови	Основні технічні параметри
1	Прилад для дослідження АЧХ	X1-48	2.048.061 ТО	Діапазон частот 0,1-150 МГц
2	Вимірювач частоти	ЧЗ-34	И22.721.032Т О	Діапазон частот 0,1-120 МГц Діапазон входних напруг 0,1 - 1,5 В
3	Підсилювач широкосмуговий	УЗ-33	ЕЯ2.723.031 ТО	Діапазон частот 1,0 - 400 МГц Коефіцієнт підсилення – 20 дБ
4	Вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі	Р4-11	ЦЮ1.400.087 ТО	Діапазон частот 1,0 -1250 МГц
5	Генератор сигналів височастотний	Г4-143	ЕЯ3.262.000 ТО	Діапазон частот 25 - 400 МГц Вихідна напруга 0,1-1,0 В
6	Осцилограф двопробеневий	С1-75	СК4.243.008 ТО	Діапазон часових інтервалів від 8 нс до 1 с . Вхідна напруга від 20 мВ до 25 В

На рис. 4.1. представлена структурна схема установки для дослідження АЧХ та комплексних опорів зустрічно-штирових перетворювачів.





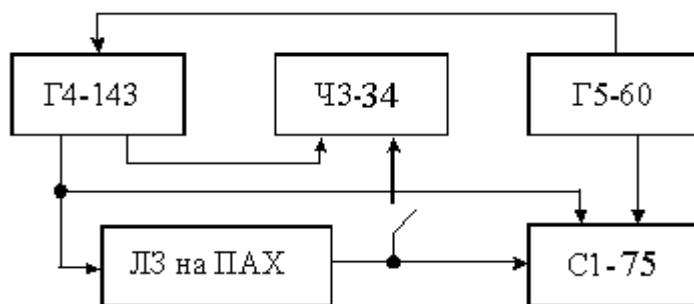
**Рис. 4.1. Структурна схема установки для дослідження АЧХ та комплексних опорів зустрічно-штирових перетворювачів**

Для дослідження АЧХ ЛЗ на ПАХ вхідний ЗШП підключається до виходу приладу для дослідження АЧХ Х1-48, а вихідний ЗШП – до широкосмугового підсилювача УЗ-33, вихід якого підключається до входу приладу Х1-48. Частотомір ЧЗ-34 дозволяє вимірювати частоту вихідного сигналу приладу Х1-48 у заданій точці.

Вимірювання комплексних опорів вхідного і вихідного ЗШП ЛЗ на ПАХ здійснюється за допомогою вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі Р4-11. Комплексний опір розраховується за формулою:  $Z = Z_0 (R + jX)$ , де  $Z_0$  - хвильовий опір вимірювального тракту (50 Ом);  $R$  – значення активної складової опору випромінювання, яке вираховується по колу сталих  $R$  на діаграмі імпедансів;  $X$  – значення реактивної складової опору випромінювання, що відраховується за кривими сталих  $X$  на діаграмі імпедансів.

Ємність ЗШП розраховується за формулою  $C_t = 1 / 2\pi fX$ . При цьому похибка вимірювання повних опорів  $Z$  і визначення ємності  $C_t$  не виходить за межі  $\pm 5 \dots 10 \%$  від одержаного результату.

На рис. 4.2. представлена структурна схема установки для дослідження параметрів ЛЗ на ПАХ.



**Рис.4.2. Структурна схема установки для дослідження параметрів ЛЗ на ПАХ**

Для виміру часу затримки на вхід ЛЗ на ПАХ поступають радіоімпульси від генератора Г4-143, за допомогою частотоміра ЧЗ-34 контролюється частота, а за допомогою двопроменевого осцилографа С1-75 вимірюється затримка високочастотного сигналу.

Експериментальні дослідження провадилися для чотирьох зразків ЛЗ на ПАХ ідентичної конструкції. Похибка вимірювання відносної амплітуди при максимальній смузі зміни частоти на екрані приладу Х1-48 не перевищує  $\pm(0,4+0,1A)$ , де  $A$  – відносна амплітуда у точці виміру дБ, але не більше 1,4 дБ. Частота високочастотного сигналу вимірюється електронним частотоміром ЧЗ-34 з основною відносною похибкою не більше  $\gamma = \pm \gamma_0 + 1 / (f \cdot t_c)$ , де  $\gamma_0 = +8 \cdot 10^{-7}$  – основна відносна похибка частоти внутрішнього кварцового генератора;  $f$  – вимірювана частота в герцах;  $t_c$  – час відліку в секундах.

#### **4.2. Результати експериментальних досліджень ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях**

Результати вимірювання комплексних опорів і ємностей наведені у таблиці № 4.2.

**Таблиця № 4.2**

##### **Результати вимірювання електричних параметрів ЗШП ЛЗ на ПАХ**

№ зразку	Найменування ЗШП	Комплексний опір $Z$ , Ом	Ємність $C$ , пФ
1	Вхідний	$550 - j144$	25,4
	Вихідний	$590 - j170$	23,2
2	Вхідний	$530 - j139$	27,0
	Вихідний	$540 - j273$	25,4
3	Вхідний	$520 - j148$	24,6
	Вихідний	$535 - j147$	26,9
4	Вхідний	$547 - j142$	25,7
	Вихідний	$558 - j153$	27,9

Результати експериментальних досліджень електричних параметрів ЛЗ на ПАХ представлено в таблиці 4.3.

**Таблиця 4.3**

**Результати експериментальних досліджень параметрів ЛЗ на ПАХ**

№ зразку	Центральна частота $f_0$ , МГц	Смуга пропускання на рівні – 3 дБ $\Delta f_3$ , МГц	Затримка $\tau_3$ , мкс	Загальні втрати на центральній частоті В, дБ
1	50,20	4,07	1,85	12,60
2	50,25	3,95	1,74	12,3
3	49,7	3,85	1,83	12,9
4	49,9	4,10	1,72	12,2

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що параметри ЛЗ на ПАХ не виходять за межі припустимих відхилень, заданих у ТЗ, і відрізняються від розрахункових не більше, ніж на 5...10 %, що підтверджує придатність розробленої методики для розрахунку ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.

Розрахунок розкиду параметрів здійснювався за формулами:

$$F = [(K_p - K_e) / K_p] \cdot 100\%,$$

де  $K_p$  – розрахункове значення параметра;

$$K_e = (K_1 + K_2 + \dots + K_j + K_n) / N,$$

$K_j$  – значення експериментально одержаного параметра  $j$ -го зразку;

$N$  – кількість зразків.

## **В И С Н О В К И**

1. Розроблено структурні схеми установок для експериментального дослідження параметрів ЛЗ на ПАХ за допомогою стандартної вимірювальної апаратури.

2. Експериментальні дослідження проводилися на чотирьох зразках ЛЗ на ПАХ ідентичної конструкції, які мають затримку сигналів в діапазоні 1,72...1,85 мкс на центральних частотах 49,70...50,25 МГц, ширину смуги пропускання на рівні – 3 дБ 3,85...4,10 МГц та привнесені втрати на центральній частоті 12,2...12,9 дБ. Значення експериментально отриманих параметрів відрізняються від розрахованих не більше 5...10 %, що підтверджує придатність розробленої фізико-математичної моделі, методик

розрахунку та дослідження параметрів ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях.

## **В И С Н О В К И**

1.Приведена порівняльна характеристика функціональних пристроїв на поверхневих акустичних хвилях. Дана класифікація ліній затримки та детально розглянуті найбільш характерні конструктивні реалізації.

2.Розроблена топологія та досліджена математична модель ЛЗ на ПАХ на основі фізичної моделі дискретних джерел сигналів, яка дозволила розрахувати амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики лінії затримки. На основі методики інженерного розрахунку визначено конструктивні та акустoeлектричні параметри ЛЗ на ПАХ, розроблено креслення експериментального зразка.

3. Технологічний процес виготовлення ЛЗ на ПАХ складається з механічної та хімічної обробки звукопроводу, формування електродних структур. Механічна та хімічна обробка є дуже важливою частиною технологічного процесу виготовлення функціональних пристроїв на ПАХ, бо недостатньо якісне очищення підкладок призводить до поганої адгезії металевої плівки, а механічні забруднення – до проколів у плівці, що ведуть до обривів електродів зустрічно-штирових перетворювачів. Формування електродних структур є основною і найскладнішою операцією при виготовленні функціональних пристроїв на ПАХ. Проблема реалізації характеристик пристроїв на ПАХ пов'язана з надійністю фотолітографічних методів, що забезпечують високу роздільну здатність, мінімальний розкид конструктивних параметрів.

Приведена порівняльна характеристика фоторезистів ФП-051МК та ФП-383, кращі результати були отримані при роботі з фоторезистом ФП-051МК. Виявлено залежність часу експонування і точності передачі розмірів елементів від температури сушіння. Як проявник, добре зарекомендував себе 0,5% розчин лугу КОН при  $T=22^{\circ}$ , рН розчині  $=12,84\pm0,01$ .

4. Розроблено структурні схеми установок для експериментального дослідження параметрів ЛЗ на ПАХ за допомогою стандартної вимірювальної апаратури. Експериментальні дослідження проведено на 4-х зразках ідентичної конструкції, які мають затримку сигналів в діапазоні 1,72...1,85 мкс на центральних частотах 49,70...50,25 МГц, ширину смуги пропускання на рівні – 3 дБ 3,85...4,10 МГц та привнесені втрати на центральній частоті 12,2...12,9 дБ. Значення експериментально отриманих параметрів відрізняються від розрахованих не більше 5...10 %, що підтверджує придатність розробленої фізико-математичної моделі та методики розрахунку ЛЗ на ПАХ.